

**INSTRUMENTACION HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CIUDAD DE TUNJA,  
CUENCAS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO**

**LUIS ALEJANDRO DURAN TORRES  
EDGAR HUMBERTO ECHEVERRÍA VIVAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2018**

**INSTRUMENTACION HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CIUDAD DE TUNJA,  
CUENCAS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO**

**LUIS ALEJANDRO DURAN TORRES  
EDGAR HUMBERTO ECHEVERRÍA VIVAS**

**Proyecto de grado en la modalidad de TRABAJO DE INVESTIGACION para  
obtener el título de Ingeniero Civil**

**Director  
EDISSON RAMIRO CEPEDA ARIAS  
Ingeniero Civil  
Especialista en Ingeniería Ambiental  
Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos - Énfasis en Investigación**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2018**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del director**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este trabajo de grado.**

**“Se autoriza su reproducción indicando su origen”**

**© 2018**

## DEDICATORIA

*A mi papá Alejandro por su sacrificio, esfuerzo y paciencia, a mi mamá por su amor, respaldo y abnegación, a mi hermano que siempre ha estado para mí. Sin el apoyo y amor de ellos en este largo camino no hubiera sido posible. Ellos son para mí la materialización de dios en la tierra.*

*Luis Alejandro Duran Torres*

*A: Dios, por darme la vida y oportunidad de estudiar, por no permitirme desfallecer en muchos momentos duros por los que pasé en el transcurso de la carrera y por estar siempre a mi lado. Mi padre Rafael Humberto Echeverría, por su apoyo y amor incondicional, por su infinita paciencia y comprensión, por ser más que un padre un amigo, y por creer en mí. Mis abuelos José Manuel Echeverría (QEPD) y Teresa de Jesús Ovalle (QEPD), por llenarme de sabios consejos que siempre llevaré en mi mente. A mi madre Alcira, mi hermana Yesica Paola, mis hermanos Andrés Felipe, y William German, por soportarme y apoyarme, los quiero mucho. Mi sobrino, Daniel Esteban, para que veas en mí un ejemplo a seguir.*

*Edgar Humberto Echeverría Vivas*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco en primer lugar al ingeniero Edison Cepeda nuestro director de tesis por su guía y apoyo, a mi familia que siempre estuvo al pendiente y a todos los ingenieros que fueron parte de mi formación. A todas las personas que conocí durante la carrera y de las cuales aprendí mucho, no necesariamente de ingeniería.*

*Luis Alejandro Duran Torres*

*A nuestro director Edison Cepeda, por su disposición y colaboración, y muy en especial a mi padre Rafael Humberto Echeverría Ovalle, ya que sin él nada de esto sería posible. Gracias papá.*

*Edgar Humberto Echeverría Vivas*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	23
OBJETIVOS.....	25
GENERAL .....	25
ESPECIFICOS .....	25
1. ESTADO DEL ARTE .....	26
1.1 INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE EN LAS CUENCAS ESTUDIADAS.....	26
1.2 MODELOS HIDROLÓGICOS .....	28
Escala .....	30
Dimensión espacial.....	30
Dimensión temporal.....	30
Eventos presentes .....	30
Planetaria .....	30
Miles de km a todo el globo.....	30
Semanas a meses .....	30
Alisios, vientos del oeste, ondas planetarias.....	30
Sinóptica.....	30
Cientos a miles de km .....	30
Días a semanas .....	30
Ciclones, anticiclones, frentes, huracanes .....	30
Meso escala.....	30
Unos a cientos de km.....	30
1 hora a 2 días.....	30
Brisas de mar, montaña, tormentas, tornados .....	30
Micro escala.....	30
Metros a unos kilómetros.....	30
Minutos a horas .....	30
Turbulencia, remolinos, Ráfagas de polvo. ....	30

1.2.1. Tipos de modelos hidrológicos.....	31
1.2.2. Componentes del modelo.....	32
1.2.2.1. Precipitación.....	32
1.2.2.2. Abstracciones hidrológicas .....	33
1.2.2.3. Escurrimiento .....	34
1.2.3 Modelos hidrológicos comerciales.....	35
1.2.3.1 HEC-1.....	35
1.2.3.2 TR-20.....	36
1.2.3.3 SWMM.....	37
1.2.3.4 SSARR.....	38
1.2.3.5 Modelo de cuenca STANFORD (SWM).....	39
1.2.3.6 Modelo de Sacramento.....	41
1.3 RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES.....	42
1.3.1 Estaciones hidrológicas urbanas.....	42
1.3.1.1 Temperatura del aire.....	43
1.3.1.2 Velocidad y dirección del viento .....	44
1.3.1.3 Presión atmosférica.....	44
1.3.1.4 Precipitación.....	45
1.3.1.5 Radiación .....	45
1.3.1.6 Evaporación.....	45
1.3.1.7 Humedad.....	46
1.3.2 Estaciones meteorológicas no urbanas .....	46
1.3.2.1 Temperatura .....	47
1.3.2.2 Presión atmosférica.....	49
1.3.2.3 Humedad.....	51
1.3.2.4 Viento de Superficie.....	51
1.3.2.5 Precipitación .....	56
1.3.2.6 Radiación.....	57
1.3.2.7 Evaporación.....	59



1.4 RECOMENDACIONES INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) .....	60
1.4.1 Niveles.....	60
1.4.1.1 Mira hidrométrica o limnómetro.....	60
1.4.1.2 Maxímetro.....	61
• Emplazamiento y recomendaciones.....	62
1.4.1.3 Limnicontacto. ....	62
1.4.1.4 Observaciones de registro continuo.....	62
1.4.1.5 Limnógrafo mecánico.....	62
1.4.1.6 Limnógrafo digital. ....	63
1.4.2 Caudal.....	63
1.4.2.1 Aforos. ....	64
1.5 DENSIDAD DE ESTACIONES. ....	65
1.6 SISTEMAS INTEGRADOS DE DRENAJE URBANO .....	67
1.7 TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.....	72
1.7.1 Aparatos de mano o portátiles.....	73
1.7.2 Aparatos para medir cada variable. ....	75
1.7.2.1 Precipitación .....	75
1.7.2.2 Viento. ....	77
1.7.2.3 Temperatura y humedad del aire.....	79
1.7.2.4 Radiación solar.....	80
1.7.2.5 Presión atmosférica.....	82
1.7.2.6 Nivel de agua.....	83
1.8 SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA.....	84
1.9 GEOESTADÍSTICA Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES. ....	86
2.METODOLOGÍA .....	90
2.1 DESARROLLO METODOLÓGICO.....	90
2.2 ZONA DE ESTUDIO.....	90
2.2.1 Generalidades del municipio de Tunja.....	91
2.2.2 Cuenca del río La Vega. ....	91

2.2.3 Cuenca del río Jordán.....	91
2.2.4 Cuenca.....	91
2.3 RECOPIACIÓN INFORMACIÓN SECUNDARIA .....	93
2.3.1 Cartografía base .....	93
2.3.2 Modelos digitales de elevación provenientes de sensores remotos	93
2.3.3 Cartografía temática.....	95
2.3.4 Fotografías aéreas.....	95
2.3.5 Imágenes de satélite.....	95
2.3.6 Estudios existentes relacionados con la zona de estudio.....	97
2.3.7 Planos generales del sistema de alcantarillado de la ciudad de Tunja	97
2.3.8 Registros históricos de la estación meteorológica de la UPTC. ....	97
2.3.9 Información de equipos y proveedores de instrumentación hidrometeorológica.....	98
2.4 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN FISIOGRAFICA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS.....	99
2.4.1 Delimitación y ubicación de la cuenca. ....	99
2.4.1.1 Delimitación, área y perímetro. ....	99
2.4.1.2 Partes de la cuenca.....	99
2.4.1.3 Orientación y posición de la cuenca.....	99
2.4.2 Parámetros morfológicos.....	99
2.4.2.1 Factor de forma ( $K_f$ ). ....	99
2.4.2.2 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius ( $K_c$ ). ....	100
2.4.2.3 Índice de alargamiento ( $R_a$ ).....	100
2.4.2.4 Índice asimétrico.....	100
2.4.2.5 Relación de circularidad ( $R_C$ ).....	101
2.4.2.6 Extensión media de la escorrentía superficial. ....	101
2.4.3 Relieve de la cuenca. ....	101
2.4.3.1 Curva hipsométrica.....	101
2.4.3.2 Elevación mediana de la cuenca según la curva hipsométrica	102
2.4.3.3 Determinación de la elevación media de la cuenca por el método de área – elevación. ....	102
2.4.3.4 Coeficiente de masividad ( $K_m$ ). ....	102
2.4.4 Cálculo de la pendiente media y mediana mediante software .....	103

2.4.5	Determinación de la pendiente por el método de Alvord .....	103
2.4.5	Drenaje. ....	103
2.4.5.1	Cálculo de la pendiente del cauce principal por el método de Taylor-Shwarz. ....	103
2.4.5.2	Cálculo de la pendiente por el método de valores extremos....	104
2.4.5.3	Cálculo de la pendiente por el método de compensación de áreas. ....	104
2.4.5.4	Perfil del cauce principal.....	104
2.4.5.5	Análisis de la red de drenaje. ....	104
2.4.5.6	Densidad de drenaje.....	104
2.4.5.7	Coeficiente de torrencialidad .....	105
2.4.5.8	Sinuosidad.....	105
2.4.5.9	Relación de bifurcación. ....	105
2.5	ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....	106
2.6	SELECCIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA ....	106
2.7	PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RED DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO. ....	106
2.7.1	Identificación de zonas urbanas para la ubicación de instrumentación meteorológica.....	107
2.7.2	Identificación de tramos y lugares de medición para variables hidrométricas en los principales afluentes de la cuenca en estudio. ....	107
2.7.3	Análisis geoestadístico de ubicación óptima de las estaciones meteorológicas.....	107
2.7.4	Planteamiento de la red de instrumentación hidrometeorológica y elaboración de cartografía .....	108
3.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	109
3.1	ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES. ....	109

3.2 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS.....	109
3.2.1. Delimitación, área y perímetro .....	109
3.2.2 Partes de la cuenca. ....	109
3.2.3 Orientación y posición de la cuenca.....	110
3.2.5 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius ( $K_c$ ).....	110
3.2.6 Índice de alargamiento ( $R_a$ ).....	110
3.2.7 Índice asimétrico. ....	111
3.2.8 Relación de circularidad ( $R_c$ ).....	111
3.2.9 Extensión media de la escorrentía superficial.....	117
3.2.10 Relieve de la cuenca. ....	117
3.2.10.1 Curva hipsométrica. ....	117
3.2.10.2 Elevación media y mediana por tratamiento estadístico con software ArcGIS. ....	119
3.2.10.3 Elevación mediana de la cuenca según la curva hipsométrica.....	119
3.2.10.4 Determinación de la elevación media de la cuenca por el método de área – elevación .....	120
3.2.11 Coeficiente de masividad ( $K_m$ ).....	121
3.2.12 Cálculo de la pendiente media mediante software. ....	122
3.2.13 Determinación de la pendiente por el método de Alvord .....	122
3.2.14 Morfología de drenaje. ....	123
3.2.14.1 Cálculo de la pendiente por el método de valores extremos ...	123
3.2.14.2 Cálculo de la pendiente del cauce principal por el método de Taylor-Schwartz .....	125
3.2.14.3 Cálculo de la pendiente por el método de compensación de áreas. ....	125
3.2.14.4 Perfil del cauce principal. ....	126
3.2.15 Análisis de la red de drenaje.....	126
3.2.16 Densidad de drenaje.....	126
3.2.17 Coeficiente de torrencialidad ( $C_t$ ).....	128
3.2.18 Sinuosidad. ....	129
3.2.19 Relación de bifurcación.....	129

3.3	ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES. ....	131
3.4	ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....	131
3.5	SELECCIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA ....	133
3.5.1	Cotizaciones recibidas .....	136
3.5.1.1	Estaciones compactas.....	136
3.5.1.2	Estaciones completas .....	137
3.5.1.3	Sensores hidrométricos.....	140
3.5.1.4	Propuesta definitiva.....	140
3.6	PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RED DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO. ....	141
3.6.1	Identificación de zonas urbanas para la ubicación de instrumentación meteorológica.....	141
3.6.2	Identificación de tramos y lugares de medición para variables hidrométricas en los principales afluentes de la cuenca en estudio.....	142
3.6.3	Análisis geoestadístico de ubicación óptima de las estaciones meteorológicas.....	147
3.6.3.1	Datos utilizados.....	147
3.6.3.2	Análisis geoestadístico de las estaciones presentes en la actualidad .....	148
3.6.3.3	Análisis geoestadístico de las estaciones presentes en la actualidad junto con las propuestas en este estudio.....	152
3.6.4	Planteamiento de la red de instrumentación hidrometeorológica y elaboración de cartografía .....	153
4.	CONCLUSIONES .....	160
	RECOMENDACIONES .....	162
	BIBLIOGRAFIA. ....	163

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estaciones meteorológicas cercanas a Tunja, según IDEAM. ....	26
Tabla 2. Escalas meteorológicas. ....	30
Tabla 3. Tipos de modelos Hidrológicos.....	34
Tabla 4. Formas de modelar el escurrimiento.....	35
Tabla 5. Tabla resumen de instrumentos para la medición de la humedad, según OMM. ....	53
Tabla 6. Instrumentos meteorológicos para medir la radiación. ....	57
Tabla 7. Densidad de estaciones según configuración fisiográfica.....	66
Tabla 8. Densidad estaciones India.....	66
Tabla 9. Densidad de estaciones según la escala del estudio.....	66
Tabla 10. Guía para modelar sistemas de drenaje urbano, según el Grupo Europeo de Investigación y Simulación. ....	70
Tabla 11. Comparación modelo físico vs conceptual. ....	71
Tabla 12. Comparación de modelos para simulación de los sistemas de drenaje urbano.....	71
Tabla 13. Ejemplos pluviómetros comerciales.....	75
Tabla 14. Ejemplo sensores de precipitación comerciales.....	76
Tabla 15. Ejemplo pluviómetro y sensor de precipitación comerciales. ....	76
Tabla 16. Ejemplo pluviómetros comerciales.....	77
Tabla 17. Ejemplo sensores de viento comerciales.....	77
Tabla 18. Ejemplo anemómetros comerciales.....	77
Tabla 19. Ejemplo anemómetros comerciales.....	78
Tabla 20. Ejemplo anemómetros comerciales.....	78
Tabla 21. Ejemplo termómetros comerciales.....	79
Tabla 22. Ejemplo sensores de temperatura. ....	79
Tabla 23. Ejemplo sensores de temperatura comerciales.....	79
Tabla 24. Ejemplo de sensores de temperatura comerciales. ....	80
Tabla 25. Ejemplo piranómetros comerciales.....	80
Tabla 26. Ejemplo sensores de radiación solar comerciales. ....	81
Tabla 27. Ejemplo piranómetros digitales comerciales. ....	81
Tabla 28. Ejemplo sensores de radiación comerciales. ....	81
Tabla 29. Ejemplo barómetros comerciales.....	82
Tabla 30. Ejemplo sensores de presión barométrica.....	82
Tabla 31. Ejemplo sensores de nivel de agua. ....	83
Tabla 32. Ejemplo sensores de nivel de agua. ....	83
Tabla 33. Ejemplo de sensores hidrométricos.....	83
Tabla 34. Clasificación del terreno según Ra.....	111
Tabla 35. Curvas de nivel y porcentaje de área acumulada.....	117
Tabla 36. Elevación media; método de área – elevación. ....	120
Tabla 37. Clases de valores de masividad.....	121
Tabla 38. Curvas de nivel cada 50 m y su longitud en Km.....	122
Tabla 39. Tramos del cauce principal y sus respectivas pendientes.....	125
Tabla 40. Longitudes de los ríos de la cuenca. ....	128

Tabla 41. Clases de densidad de drenaje.....	128
Tabla 42. Relación de bifurcación.....	129
Tabla 43. Precios estaciones.....	137
Tabla 44. Comparación precios.....	137
Tabla 45. Comparación opciones.....	139
Tabla 46. Valor instrumentación.....	141
Tabla 47. Resultados estadística descriptiva .....	147
Tabla 48. Precipitación media anual.....	148

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación	
( 1) Longitud axial, a .....	99
( 2) Factor de forma, Kf .....	100
( 3) Indice de Gravelius, Kc .....	100
( 4) Indice de alargamiento, Ra .....	100
( 5) Indice asimétrico, I <sub>as</sub> .....	101
( 6) Relación de circularidad, R <sub>c</sub> .....	101
( 7) Extensión media de la escorrentía superficial, <i>i</i> .....	101
( 8) Elevación media de la cuenca, E <sub>m</sub> .....	102
( 9) Coeficiente de masividad, K <sub>m</sub> .....	103
( 10) Elevación media de la cuenca, S <sub>m</sub> .....	103
( 11) Pendiente del cauce principal, S <sub>m</sub> .....	103
( 12) Pendiente por valores extremos, S .....	104
( 13) Densidad del drenaje, D <sub>d</sub> .....	105
( 14) Coeficiente de torrencialidad, C <sub>t</sub> .....	105
( 15) Sinuosidad, S .....	105
( 16) Relación bifurcación, R <sub>b</sub> .....	105



## LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Estaciones cercanas a la ciudad de Tunja. ....	27
Mapa 2. Zona de estudio.....	92
Mapa 3. Limite Urbano y Rural.....	94
Mapa 4. Uso del suelo en Tunja.....	96
Mapa 5. Sistema de alcantarillado de Tunja.....	98
Mapa 6. Delimitación de la cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. ....	112
Mapa 7. Área y perímetro cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. ....	113
Mapa 8. Cuenca alta, media y baja de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.....	114
Mapa 9. Orientación y posición de la cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. .....	115
Mapa 10. Índice asimétrico cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.....	116
Mapa 11. Mapa de pendientes.....	124
Mapa 12. Numero de orden.....	127
Mapa 13. Sinuosidad.....	130
Mapa 14. Zonas climatológicas urbanas (ZCU) para Tunja. ....	144
Mapa 15. Centroides zonas climatológicas urbanas.....	145
Mapa 16. Ubicación sensores hidrométricos.....	146
Mapa 17. Mapa de error estándar en porcentaje de las estaciones existentes en la cuenca de estudio mediante interpolación por Kriging.....	150
Mapa 18. Mapa de interpolación de la precipitación media anual (Pm) en milímetros mediante el método IDW.....	151
Mapa 19. Distribución de estaciones existentes y nuevas en cuenca alta, media y baja.....	154
Mapa 20. Error estándar en % para la primera distribución de estaciones propuesta mediante interpolación por Kriging.....	155
Mapa 21. Predicción de la precipitación en milímetros para la primera distribución de estaciones propuesta mediante interpolación por IDW. ....	156
Mapa 22. Diferencia entre las primeras propuestas de estaciones y la propuesta definitiva. ....	157
Mapa 23. Error estándar para la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas mediante interpolación por el método de Kriging.....	158
Mapa 24. Predicción de la precipitación para la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas mediante interpolación por el método IDW. .	159

## LISTA DE GRAFICAS.

Gráfica 1. Curva hipsométrica .....	118
Gráfica 2. Edad del río según su curva hipsométrica.....	118
Gráfica 3. Altas montañas y valles extenso.....	119
Gráfica 4. Altas planicies y valles profundos.....	119
Gráfica 5. Elevación media según la curva hipsométrica. ....	120
Gráfica 6. Diagramas de caja y patilla.....	148

## LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Estaciones meteorológicas caseras. TFA 35.1089IT y La Crosse WS9250.....	72
Imagen 2. Estaciones meteorológicas caseras con anemómetro. TFA 35.1140 y La Crosse WS6868.....	73
Imagen 3. Medidores climatológicos portátiles. PCE-THA 10.....	74
Imagen 4. Estaciones climatológicas portátiles.....	74
Imagen 5. Medidor climatológico PCE-FWS 20. ....	75
Imagen 6. Modelo de elevación digital.....	93
Imagen 7. Fotografía aérea de Tunja.....	95
Imagen 8. Imagen satelital de Tunja. ....	95
Imagen 9. Informe climatológico estación UPTC. ....	97
Imagen 10. Ejemplo estaciones Campbell Scientific.....	134
Imagen 11. Ejemplo estaciones ofrecidas por Meteagro .....	135
Imagen 12. Ejemplo estaciones Whatchdog y Rainswise. ....	135
Imagen 13. Ejemplo estaciones compactas Vantage.....	136
Imagen 14. Ejemplo estación Ambient Weather. ....	137
Imagen 15. Estación meteorológica IDEAM, ubicada en Paipa. ....	138
Imagen 16. Estación hidrometeorológica IDEAM sobre el rio Cravo Sur en Labranzagrande. ....	138
Imagen 17. Estación hidrometeorológica IDEAM sobre el rio Cusiana. Vía Sogamoso-Yopal.....	139
Imagen 18. Opción 1 y 2, propuestas por Agroelectrónica.....	140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escalas meteorológicas.....	30
Figura 2. Clasificación simplificada de distintas formas urbanas organizadas por orden decreciente aproximado de su capacidad para afectar al clima local (Oke, 2004, sin publicar).....	43
Figura 3. Disposición de una estación de observación en el hemisferio norte que muestra las distancias.....	48
Figura 4. Elevación media y mediana. ....	119
Figura 5. Pendiente media calculada con el software ArcGis.....	122
Figura 6. Validación cruzada entre el IDW y Kriging de las estaciones existentes. ....	149
Figura 7. Validación cruzada entre el IDW y Kriging de las estaciones nuevas junto con las existentes. ....	152
Figura 8. Validación cruzada entre IDW y Kriging de la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas.....	153

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Cartografía generada como resultado del trabajo de investigación.

ANEXO B. Versión digital de este trabajo de investigación.

## RESUMEN

En el presente estudio ha sido estimado el número de estaciones hidrometeorológicas y su óptima ubicación, para la implementación de una red de monitoreo que minimice los posibles errores de interpolación espacial sin incurrir en un uso exagerado de puntos de medición en las cuencas hidrográficas de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. Han sido consideradas recomendaciones nacionales e internacionales como las del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), junto con restricciones y especificaciones técnicas para la implantación de las estaciones en la zona de estudio. Fisiográficamente fueron caracterizadas las cuencas en su parte rural y urbana, y correlacionas con los posibles modelos matemáticos hidrológicos más aplicables, según sus particularidades. También ha sido realizado el análisis geoestadístico para diferentes distribuciones espaciales de estaciones propuestas, considerando información de precipitación media anual de las estaciones existentes en las cuencas, y las más próximas a su perímetro, a una distancia máxima de 4 km. Se ha implementado como dato de precipitación para las nuevas estaciones, según recomendaciones de la OMM, un promedio de la precipitación media anual en las estaciones existentes, con el fin de considerar la variabilidad netamente espacial en la ubicación. Las características de las estaciones hidrometeorológicas propuestas han sido obtenidas en función de la cantidad y calidad de los datos necesarios para posible modelamiento futuro, además de cumplir con los requerimientos de precisión establecidos por las recomendaciones nacionales e internacionales.

## INTRODUCCIÓN

Toda actividad humana genera impactos ambientales, unos en mayor magnitud que otros. Estos impactos van desde el deterioro de un ecosistema o variaciones en el clima, como lo es el calentamiento global. Debido a estos impactos y el cambio climático se debe considerar una adecuada planeación de los recursos naturales, implicando un monitoreo exigente y adecuado de las diferentes variables necesarias para modelar su comportamiento pasado con fines de pronóstico futuro.

El recurso hídrico no es ajeno a estas dinámicas, ya que es uno de los recursos más afectado por la actividad humana y que de la misma forma genera más riesgos para el hombre. El abastecimiento de agua para las diferentes actividades humanas (agua potable, industria, comercio, transporte, generación de energía, ocio, etc.) y los riesgos por exceso o falta de ésta (inundaciones, deslizamientos, sequías, etc.) crea la necesidad de la planificación, no solo desde el punto de vista de cantidad, o calidad, sino también en aspectos relacionados con el control de los posibles efectos adversos, la gestión del riesgo y el correcto dimensionamiento de estructuras hidráulicas.

En la ciudad de Tunja la información hidrometeorológica necesaria para la planificación, diseño, manejo, control e investigación del recurso hídrico es demasiado escasa, teniendo en cuenta que en jurisdicción de la ciudad solo existe una estación meteorológica, (climatológica principal) ubicada en predios de la UPTC, la cual cuenta con registros de aproximadamente de cuarenta (40) años (complementada con la reciente instalación de una estación automática) y una estación limnimétrica hacia el norte de la ciudad, en jurisdicción de Motavita.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la zona de influencia de dichas estaciones es poco representativa del área correspondiente a las dos cuencas que confluyen en la ciudad, impidiendo el adecuado empleo de modelos matemáticos hidrológicos, a nivel de cuenca urbana y rural. Por estas razones y junto con el notable crecimiento de la ciudad durante las últimas décadas, se pone en evidencia la exigencia de tomar las mejores decisiones relacionadas con el manejo de los recursos hídricos.

La adecuada ubicación de estaciones hidrometeorológicas en una zona de estudio exige considerar recomendaciones técnicas, las cuales se encuentran en documentos oficiales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el IDEAM para el caso de Colombia. A nivel general, se pueden considerar dos tipos de instrumentación según su ubicación (zona), urbana y rural, respectivamente. Cada zona tiene sus requerimientos específicos, en especial la urbana, ya que la configuración de las construcciones es una limitante para la ubicación de los sitios

de medición; mientras que para la zona rural, la densidad de estaciones por unidad de área, siendo la única limitante.

Los aparatos o sensores hidrometeorológicos (instrumentación) necesarios para realizar las mediciones también deben cumplir requerimientos mínimos en cuanto a precisión, toma, capacidad de almacenamiento y transmisión de datos, lo cual garantizaría la homogeneidad de los registros y su empleo en estudios proyectos de investigación. Este proyecto particularmente permitió optar por estaciones compactas en la zona urbana, debido al espacio reducido para su implantación; y en la zona rural, estaciones automáticas.

La adecuada distribución espacial de la red de instrumentación meteorológica propuesta se estimó mediante el empleo de herramientas geoestadísticas, considerando estaciones cercanas a la zona de estudio, de las cuales se utilizaron los datos medios de precipitación de los últimos veinte cinco (25) años, agregados a nivel anual en cada estación (precipitación media total anual). Con la ayuda del software ArcGis y los registros mencionados anteriormente, se emplearon modelos de predicción de la precipitación tanto para las estaciones existentes como para las redes propuestas. Estos datos fueron comparados, evidenciándose una disminución del error en las predicciones y un incremento considerable de la cobertura de la red, llegando a abarcar la totalidad de la zona de estudio.

Por otra parte, el diseño de la red de instrumentación es complementado con la propuesta de ubicación de estaciones de medición hidrométrica en lugares de interés hidrológico en las cuencas. Por último es presentado un análisis económico, el cual incluye el suministro e instalación de cada una de las estaciones, capacitación de personal y garantía durante un año.



## OBJETIVOS

### GENERAL

Plantear una alternativa técnicamente viable de red de instrumentación hidrometeorológica, representativa de las cuencas de los ríos Jordán, La Vega y Chulo, que contribuya en el futuro al manejo integral del drenaje urbano y los recursos hídricos en la ciudad de Tunja.

### ESPECIFICOS

- Identificar las zonas, sectores y lugares apropiados para la medición de variables hidrometeorológicas en las cuencas urbanas y rurales con incidencia directa en la ciudad.
- Establecer las tecnologías de instrumentación más adecuadas para la medición de variables hidrometeorológicas de acuerdo con las características hidrológicas particulares de las cuencas urbanas y rurales.
- Analizar la mejor opción de instrumentación hidrometeorológica que permita obtener la más útil y completa información necesaria para la implementación de modelos matemáticos hidrológicos con propósito de pronóstico, prevención de desastres y generación de alertas tempranas en la ciudad de Tunja.

## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1 INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE EN LAS CUENCAS ESTUDIADAS.

Según el IDEAM y la información que este ofrece en su portal de internet (<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>) existe una estación climatológica principal (CP) en el casco urbano de la ciudad de Tunja, asociada a la corriente del río Chulo, hacia el norte de la ciudad en jurisdicción del municipio de Motavita se encuentra la estación Nariño (limnimétrica) asociada a esta misma corriente, estas dos estaciones se pueden considerar las más representativas para la ciudad de Tunja. Además de las dos estaciones mencionadas también se tienen en cuenta las estaciones pluviométricas de Pánelas la cual está en la parte alta de la cuenca del río Chulo y la estación Pila Fca en el municipio de Soracá, estas cuatro estaciones son las más tenidas en cuenta ya que abarcan gran parte del municipio.

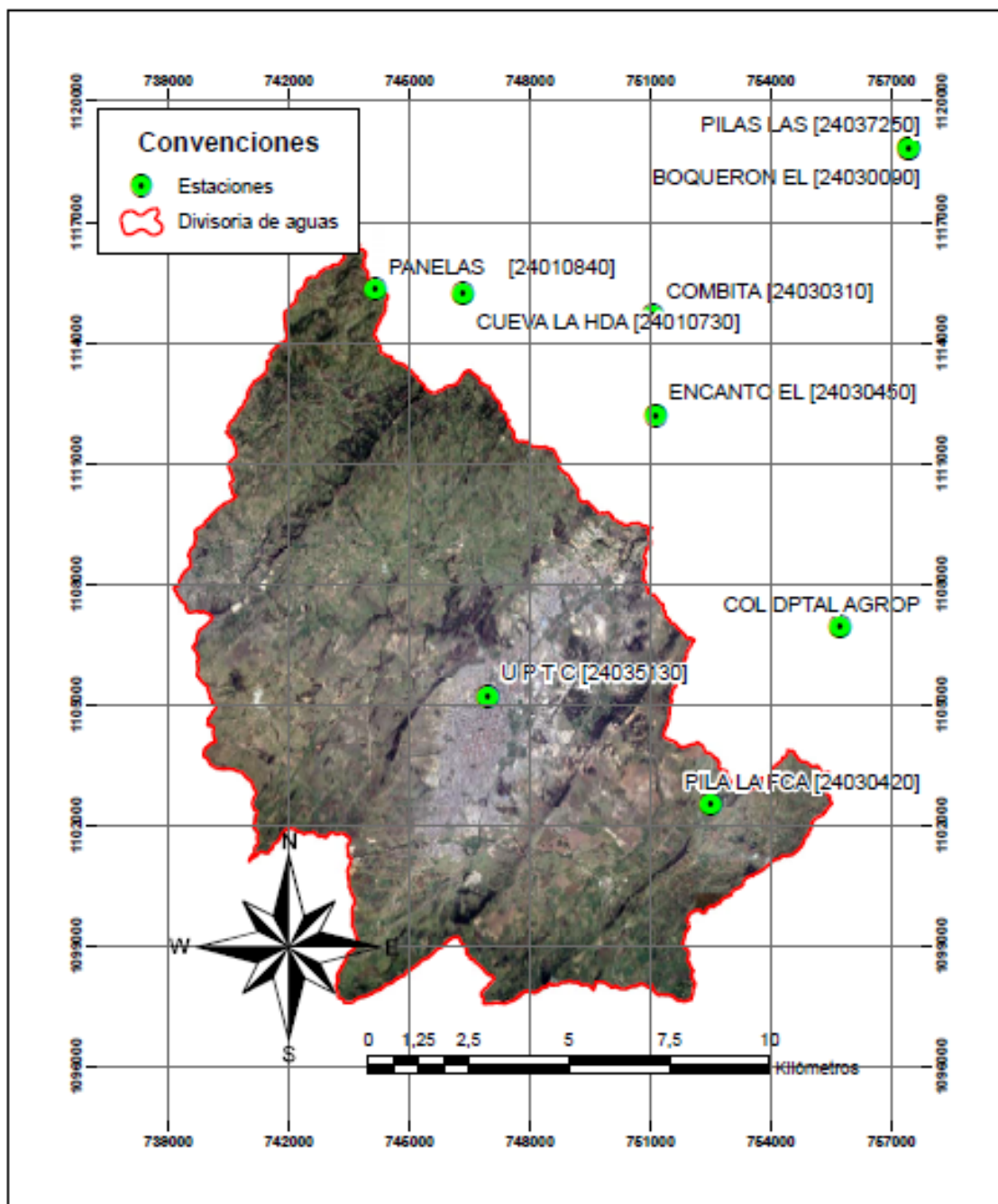
Fuera de la zona de estudio existen cuatro estaciones pluviométricas distribuidas en los municipios de Combita, Oicatá, Tuta y Siachoque, también existen dos estaciones limnimétricas ubicadas en los últimos dos municipios, la estación de Tuta está asociada a la corriente del río Chulo y se encuentra cerca de la confluencia de este río con el Chicamocha. De las estaciones mencionadas todas se encuentran actualmente activas, a excepción de la última, ya que esta se encuentra suspendida, en la Tabla 1 y mapa 1 se pueden apreciar las estaciones hidrometeorológicas más relevantes en la ciudad de Tunja y sus alrededores.

Tabla 1 Estaciones meteorológicas cercanas a Tunja, según IDEAM.

Código	Nombre	Clase	Categoría	Activa	Municipio	Corriente
24010840	Pánelas	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Motavita	Pómeza
24010730	Cueva la hda	Meteorológica	Pluviométrica	No	Motavita	Suarez
24035130	Uptc	Meteorológica	Climatológica principal	Si	Tunja	Chulo
24030420	Pila la fca	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Soraca	Qda Puente Hamaca
24030500	Col Dptal Agrop	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Chivatá	Qda El Raque
24030450	El Encanto	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Oicatá	chulo
24030310	Cómbita	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Cómbita	chulo
24030090	El Boquerón	Meteorológica	Pluviométrica	No	Tuta	Chicamocha
24037250	Pilas Las	Hidrológica	Limnimétrica	No	Tuta	chulo
24030140	Siachoque	Meteorológica	Pluviométrica	Si	Siachoque	Firaya
24037550	Siachoque	Hidrológica	Limnimétrica	si	Siachoque	Firaya

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 1. Estaciones cercanas a la ciudad de Tunja.



Fuente: Elaboración propia

El municipio en su zona urbana cuenta con una sola estación de la red IDEAM, ubicada la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Las características generales de clasificación dadas por el IDEAM, indican que su categoría corresponde a una estación agro-meteorológica principal, codificación 3-1123, asignada a la Facultad de Agronomía. Fue instalada inicialmente a partir de 1962, luego en coordinación con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se reorganizó en diciembre de 1967, pasando a la categoría mencionada anteriormente y siendo ubicada 10 m arriba de la ubicación inicial. La estación está dotada con un pluviógrafo de registro diario, pluviómetro, actinógrafo, heliopirógrafo, evaporímetro, tanque de evaporación, psicrómetro, termómetro, hidrógrafo, higrómetro, barómetro y barógrafo. Recientemente, contigua a la estación climatológica principal fue instalada por el IDEAM una estación de apoyo automática.

## 1.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

La base de la hidrología es el entendimiento del ciclo hidrológico en cada uno de sus componentes ya sea en procesos superficiales, subsuperficiales o una combinación de estos. Las mediciones de precipitación, caudales, niveles de agua, entre otros, surgen como una herramienta para la comprensión del ciclo hidrológico. Pero también se deben tener en cuenta parámetros como la topografía, uso del suelo, tipo de suelo, cobertura del suelo, los cuales son importantes debido a que cada sitio tiene cualidades particulares haciendo que la estimación y análisis de la cantidad de agua en un determinado lugar sea compleja y única, como respuesta a estos planteamientos surgen los modelos hidrológicos, los cuales tienen en cuenta las mediciones y las características fisiográficas de las cuencas.

La finalidad de un modelo hidrológico es estimar la cantidad de agua en el suelo ya sea en su contenido de humedad o superficial que se convierte en escorrentía dentro de una cuenca urbana, rural o mixta. Determinar la cantidad de agua de escorrentía superficial tiene relevancia en la estimación y disponibilidad de esta para consumo humano (doméstico, comercial, industrial, etc.), delimitación de zonas de riesgo por inundación, y en el saneamiento ya sea evacuando las aguas residuales o la escorrentía producto de las precipitaciones<sup>1</sup>.

La modelación es una “representación matemática simplificada de un fenómeno físico observable ocurriendo en el mismo ” (Jiménez, 2008), para el caso de la modelación hidrológica se puede considerar como la interacción de los componentes hidráulicos e hidrológicos dando como resultado un hidrosistema. El

---

<sup>1</sup> JIMENEZ AVELLA, Wilson Alejandro. Instrumentación y análisis de la variación espacial y temporal de la precipitación en la respuesta de una cuenca urbana. caso de estudio campus Universidad Nacional sede Bogotá. Tesis de Maestría. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2008. 17 p.

componente hidráulico o modelación hidráulica es la que de forma sencilla describe el transporte del agua proveniente de lluvias y de descargas residuales, utiliza ecuaciones básicas de mecánica de fluidos para representar la variación del flujo en las tres dimensiones, pero en casos específicos por simplificación, solo se considera en una, la descripción de su comportamiento está dada por la ecuación de momentum de Saint-Venant, la cual es utilizada para realizar el tránsito de crecientes, pudiendo ser: de onda cinemática, onda de difusión y onda dinámica. Para el tránsito en la modelación hidrológica se ignora la variación espacial de los parámetros y se basa en la ecuación de conservación de la masa, para esto se han desarrollado métodos como el hidrograma unitario, el método Muskingum y el almacenamiento lineal y no lineal.<sup>2</sup>

Los fenómenos climáticos en la tierra están relacionados entre sí por la escala a la que ocurren, los estudios de climatología han subdividido las escalas en: macro escala, meso escala y micro escala, las cuales se diferencian por el tamaño que tienen en kilómetros cuadrados, lo que se conoce como regional y local, tendrían lugar entre la meso escala y micro escala. Al tener en cuenta como estos fenómenos es importante considerar que se entrelazan desde lo macro hasta lo micro, y como afectan determinada zona de estudio podría dar luces sobre a qué variables climatológicas prestar atención dentro de un estudio hidráulico o hidrológico<sup>3</sup>.

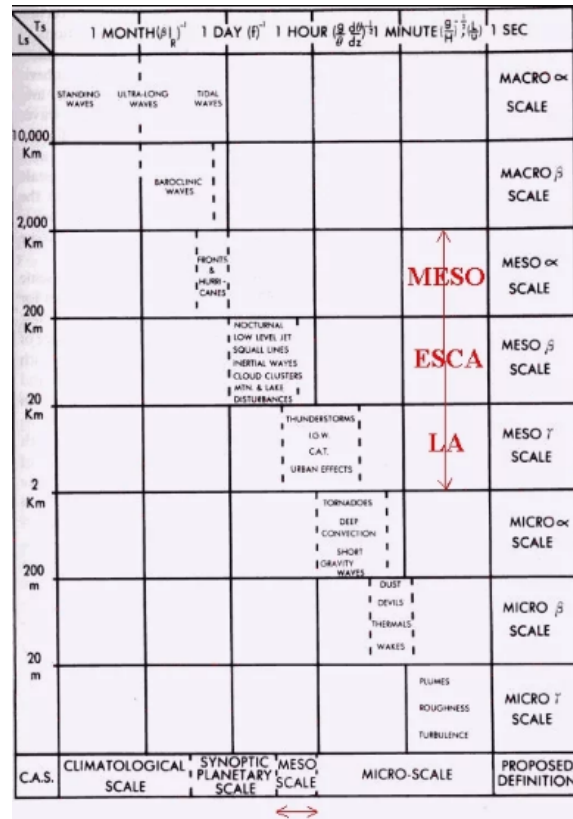
En la siguiente figura se puede observar la clasificación de escalas meteorológicas propuesta por Orlanski en 1975.

---

<sup>2</sup> PONCE, Víctor M. Catchment Hydrology. En: Engineering Hydrology: Principles and Practices. 2 ed. Online: 2014. 389 p

<sup>3</sup> JIMENEZ. Op. Cit. P 18.

Figura 1. Escalas meteorológicas.



Fuente: Orlanski en 1975.

### Tabla 2. Escalas meteorológicas.

Escala	Dimensión espacial	Dimensión temporal	Eventos presentes
Planetaria	Miles de km a todo el globo	Semanas a meses	Alisios, vientos del oeste, ondas planetarias
Sinóptica	Cientos a miles de km	Días a semanas	Ciclones, anticiclones, frentes, huracanes
Meso escala	Unos a cientos de km	1 hora a 2 días	Brisas de mar, montaña, tormentas, tornados
Micro escala	Metros a unos kilómetros	Minutos a horas	Turbulencia, remolinos, Ráfagas de polvo.

Fuente: Elaboración propia

1.2.1. Tipos de modelos hidrológicos. La cantidad de modelos hidrológicos disponibles para realizar una simulación son bastantes ya que gobiernos nacionales, regionales, locales y hasta las mismas universidades han venido desarrollando sus modelos. Los modelos hidrológicos se han desarrollado de manera material y de manera formal, siendo esta última la más utilizada ya que parte de una abstracción matemática para simular estos procesos. Los modelos materiales son caros de implementar ya que parten de una representación física a escala de un sitio determinado haciendo que esto sea más complicado y además de que no aplica en todo tipo de cuencas debido a la complejidad de su configuración.

Los modelos hidrológicos basados en la matemática o modelos formales tienen una gran clasificación ya que pueden ser de naturaleza teórica o empírica, también una fusión de estos dos son los modelos conceptuales. Al ser basados en las matemáticas los parámetros o componentes de estos pueden ser variables o invariables, lineales o no lineales, distribuido o continuo, determinístico o probabilísticos.

Un modelo determinístico está basado en parámetros, variables y ecuaciones (físicas-químicas) implicando una relación causa-efecto entre las variables y parámetros con los resultados obtenidos de las ecuaciones. Los modelos probabilísticos pueden ser estadísticos o estocásticos, los primeros utilizan datos observados (series históricas) y los estocásticos la estructura del azar dentro de un grupo de estos datos<sup>4</sup>.

Las simplificaciones de los procesos fisicoquímicos son descritas matemáticamente ya sea en forma algebraica o de ecuaciones diferenciales simulando procesos complejos, estos son los elementos de los modelos conceptuales. Los modelos paramétricos o empíricos son los más simples de todos, están basados en los parámetros empíricos en los que se basa la solución, ósea consta de una ecuación (ecuaciones) con parámetros determinados por el análisis de series históricas.

También existen los modelos lineales los cuales son simples, fáciles de utilizar sus parámetros son constantes, pero pierden detalles en la modelación. Los modelos no lineales son los más comunes, sus parámetros no son constantes, pero también son los más complejos. Adicional a estos también hay modelos de tiempo invariable y tiempo variable, en el primero los parámetros se mantienen constantes en el tiempo.

La variación de los parámetros a lo largo de la cuenca hace que el modelo sea distribuido, pero para su aplicación se hace necesario tener una buena cantidad

---

<sup>4</sup> PONCE. Op. Cit. 389 p

de datos. Cuando los parámetros no varían dentro de la cuenca se llama modelo global.

Cuando se hace uso de ecuaciones derivables los modelos pueden ser continuos o discretos. Los primeros pueden tener solución en cualquier punto, para los segundos la solución se puede encontrar solo en unos puntos determinados.

Los problemas simplificados con condiciones iniciales y de frontera que se pueden solucionar con herramientas de la matemática clásica se les llaman modelos analíticos. Los que tienen aplicaciones reales y para su solución es necesaria la utilización de diferencias finitas y elementos finitos se les conoce como modelos numéricos.

Los eventos a modelar pueden ser aislados, de corto plazo, individuales como el escurrimiento o una inundación estos se conocen como modelos de eventos aislados. Los modelos de procesos continuos toman en cuenta los componentes del escurrimiento, evapotranspiración y otras abstracciones.<sup>5</sup>

1.2.2. Componentes del modelo. Víctor Manuel Ponce (2014) propone los siguientes componentes de un modelo hidrológico.

1.2.2.1. Precipitación: puede ser lluvia o nieve, para este trabajo interesa la lluvia la cual tiene como consecuencia el escurrimiento por el exceso de la precipitación. Esta puede ser descrita por los siguientes términos.

- Intensidad de la lluvia: el tamaño de la cuenca es importante en este factor, ya que en una cuenca pequeña si el periodo de intensidad es igual al tiempo de concentración, la precipitación puede considerarse como parámetro de lluvia primario. Para cuencas medianas se tienen en cuenta la intensidad, la profundidad, duración y distribución temporal de los datos pertinentes para el análisis. En cuencas de gran tamaño la distribución espacial toma relevancia. En general se hace uso de promedios espaciales y temporales para la descripción de la lluvia.
- Duración de la lluvia: puede variar desde unos minutos hasta varios días, si una cuenca está sujeta a una lluvia constante y prolongada puede alcanzar una condición de equilibrio por el escurrimiento. Las cuencas pequeñas logran este tiempo de concentración más rápido que las otras, esto hace que se asuma un flujo concentrado. Para las cuencas medianas está en función de la altura de lluvia y la distribución temporal, la duración de diseño es aquella que produce el valor de caudal pico más alto para una profundidad de lluvia dada y una distribución temporal, en estas se asume un flujo subconcentrado. En las cuencas grandes la distribución espacial de

---

<sup>5</sup> PONCE. Op. Cit. P 389-391



la tormenta es de gran importancia, ya que las tormentas son vistas en dos partes la primera produce poco escurrimiento, aumentando la humedad dentro de la cuenca la segunda ocurre después con una condición de humedad antecedente mayor produciendo una mayor cantidad de escurrimiento.

- **Altura de la lluvia:** en cuencas pequeñas la altura de lluvia implica asumir una intensidad de lluvia constante en una cierta duración. En las cuencas de tamaño medio es utilizada junto con una tormenta de distribución adimensional elegida para desarrollar un hietograma. Para las cuencas de gran tamaño se utilizaría el concepto de precipitación máxima probable a cambio de intensidad-duración-frecuencia, debido a los riesgos implícitos en proyectos como el llenado de embalses.
- **Frecuencia de lluvia:** el que se tenga una altura mayor disminuye las probabilidades de que vuelva a ocurrir, la frecuencia de lluvia está ligada al periodo de retorno de una lluvia estos periodos pueden variar entre los 5 y 10 años dependiendo la magnitud del proyecto y llegar hasta 50-100 años cuando ya son muy grandes, la elección de estos periodos de retorno va de la mano con la experiencia profesional. Según el RAS en su capítulo D establece periodos de retorno en un rango de 3 a 100 años.
- **Distribución temporal:** el tamaño y la uniformidad de la distribución espacial en una cuenca influencia la respuesta hidrológica que esta tendrá, además de tener en cuenta el tamaño de la cuenca. Con la correcta elección de una distribución adimensional en una cuenca de tamaño medio se puede obtener un hietograma para una tormenta de diseño, en la modelación la correcta y juiciosa de una distribución temporal hace que el cálculo del caudal pico sea más segura.
- **Distribución espacial:** Para cuencas grandes, la modelación gira alrededor de la distribución espacial de la tormenta. Las tormentas que cubren áreas grandes tienden a tener formas elípticas. Por el tamaño de unas cuencas (grandes) se pueden considerar tormentas locales o generales, las locales tienen una alta intensidad y abarcan solo una fracción de la cuenca; la baja intensidad la larga duración y el abarcar en su totalidad la cuenca son características de las tormentas generales. Estos dos tipos de tormenta pueden producir escurrimiento e inundaciones de magnitud comparable.

1.2.2.2. **Abstracciones hidrológicas:** se consideran las abstracciones como aquellos procesos fisicoquímicos que reducen la precipitación total a precipitación efectiva, la cual será después escurrimiento.

- Intercepción: la intensidad y la frecuencia de las tormentas es un elemento importante en la intercepción ya que en una tormenta de baja intensidad y una frecuencia baja la intercepción es una parte pequeña de la lluvia total. Las tormentas que tiene una alta frecuencia de ocurrencia son abstraídas en gran parte por la intercepción.
- Infiltración: por su variación en el tiempo y en el espacio la modelación de la infiltración es una tarea compleja. Es considerada una abstracción primaria y de su cálculo dependerá el valor de escurrimiento final. Su simulación se puede llevar a cabo por diferentes tipos de modelos.

Tabla 3. Tipos de modelos Hidrológicos.

Tipo de modelo	Formula
Determinístico	Green y Ampt.
Conceptual	Curva de escurrimiento SCS
Paramétrico	Perdidas en HEC

Fuente: Elaboración propia.

- Almacenamiento superficial: está en función de su orografía. En tierras pequeñas y montañosas puede ser despreciables, en tierras bajas y desagües urbanos el proceso se vuelve más complejo.
- Evaporación: este concepto es utilizado en su mayoría para cuantificar la pérdida de agua en lagos y cuerpos de agua en regiones áridas y semiáridas la cual se tendrá en cuenta para hacer los balances de agua en una cuenca. Se puede calcular por medio de: balance de agua, balance de energía, técnicas de transferencia de masa.
- Evapotranspiración: puede ser tomada como evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, es modelada de forma similar a la evaporación y en los modelos de proceso continuo es tomada como una abstracción inicial.

1.2.2.3. Escurrimiento: pueden existir dos tipos de escurrimiento, el que ocurre en la cuenca y el que ocurre en un canal. Para el primero se puede considerar el flujo en las tres dimensiones, pero se concentra en un punto al final de esta donde pasa a transitar en el canal debido a la orientación longitudinal del flujo, este se puede considerar unidimensional. Se puede modelar de la siguiente forma:

Tabla 4. Formas de modelar el escurrimiento.

Distribuida	Concentrada
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convolución del hidrograma unitario</li> <li>• Fácil de implementar</li> <li>• No requiere tantos datos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ondas de difusión o cinemática</li> <li>• Más detallado, pero más complejo su implementación.</li> <li>• Requiere una cantidad sustancial de datos físicos para la implementación.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.3 Modelos hidrológicos comerciales.

1.2.3.1 HEC-1. Es utilizado en la simulación de eventos de flujo en cuencas receptoras y en cuencas de río. Es un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos (canal, reservorio), cada componente puede modelar un aspecto de la precipitación y escurrimiento además de conocer cada uno de sus parámetros y leyes físicas que lo gobiernan. Da como resultado una suma de hidrogramas de crecida (descargas), no tiene en cuenta la humedad de recuperación cuando hay periodos secos y tampoco los efectos dinámicos debido al relieve.

Para hacer un modelado con el HEC-1 la cuenca se debe dividir en subcuencas haciendo uso de mapas topográficos, además de tener en cuenta el propósito del estudio y la variabilidad espacial de la precipitación. Las suposiciones de uniformidad hacen menos seguro esta simulación a medida que el tamaño de la cuenca aumenta. Para la modelación del escurrimiento se toma como entrada un hietograma de precipitación teniendo en cuenta la infiltración y el almacenamiento superficial para así obtener la lluvia efectiva. La lluvia e infiltración se asumen como uniformes en el espacio.

La salida es un hidrograma obtenido por medio de la convolución del hidrograma unitario o por ruteo de la onda cinemática, al final al hidrograma se le agrega el flujo base obtenido por métodos empíricos y así obteniendo como resultado el flujo al final de la cuenca.

Puede simular cada evento por aparte (escurrimiento y flujo en el río) o en conjunto para poder representar la complejidad de la lluvia esorrentía y la propagación en la red de corrientes. Tiene en cuenta aspectos como el almacenamiento en las cuencas (reservorios), derivaciones o bifurcaciones para transferencias y los pozos de bombeo.

Los componentes de la simulación en el HEC son la precipitación el hietograma (tormentas históricas, tormentas sintéticas, IDF) como la entrada.

Intercepción/Infiltración en almacenamiento superficial e infiltración (perdidas) pueden ser calculadas por pérdidas iniciales y valor constante, por una función general de tasa de infiltración definida por el HEC, número de curva del escurrimiento (SCS) y por la tasa de pérdida de Horton. El hidrograma unitario puede ser el obtenido por el método de Snyder, adimensional SCS y unitario de Clark. La onda cinemática transforma el exceso de lluvia en escurrimiento teniendo en cuenta los planos de flujo por tierra, canales colectores y el canal principal. El flujo base tiene influencia en el hidrograma con los siguientes parámetros: flujo inicial en la corriente, flujo de entrada, valor de declinación exponencial.<sup>6</sup>

1.2.3.2 TR-20. Desarrollado por el Servicio de conservación de suelos (USDA) en cooperación con otras agencias (Laboratorio Hidrología del Servicio de Investigación Agrícola), cuenta con 21 versiones siendo la última la del año 1983 inicialmente desarrollado en 1965.

Ayuda en la evaluación hidrológica de los eventos de inundación enfocado en el análisis de recursos hídricos. Es un modelo de eventos, no tiene en cuenta la recuperación de la humedad del suelo. Computa el escurrimiento de cualquier tipo de lluvia (natural o sintética), puede desarrollar hidrógrafas de inundación el flujo lo dirige por reservorios y canales. Cuenta con nueve distribuciones de cuenca, diferentes tratamientos de tierra y estructura hidráulica (estructuras de retardo, canales, derivaciones).

La cuenca se divide en tantas partes como sea posible para definir los efectos estructurales e hidrológicos. Los efectos hidrológicos son las confluencias tributarias, forma de la cuenca, topografía, número de curva, estructuras hidráulicas presentes. Las particiones de la cuenca son hidrológicamente homogéneas (distribución temporal de la lluvia es representativa del total o de la parte). Para obtener la hidrógrafa de escurrimiento es necesario tener las siguientes variables de entrada: escurrimiento SCS, volumen de la lluvia, distribución de la lluvia. Los números de curva están basados en los grupos de suelos hidrológicos, uso de la tierra, prácticas de tratamiento, condición de la superficie hidrológica. Tiene tres niveles de humedad: seco, promedio y húmedo.

Genera el hidrograma compuesto en cada salida partiendo de la lluvia efectiva. El valor de flujo pico se obtiene ajustando las tres mayores ordenadas del hidrograma en un polinomio de segundo grado. El intervalo de tiempo es ajustado por la experiencia del ingeniero, se puede tomar de 1/5 a 1/10 del tiempo de concentración de la subcuenca. Se debe estimar la base de tiempo del hidrograma de flujo de salida, está relacionado al tamaño de la subcuenca y la duración de la tormenta.

---

<sup>6</sup> PONCE, Victor M. Catchment Hydrology. En: Engineering Hydrology: Principles and Practices. 2 ed. Online: 2014. P 406-413

Dirige el escurrimiento a través de un reservorio usando el método de indicación del almacenaje. Toma la elevación inicial para ruta o dirección o elevación del almacenaje cuando comienza el escurrimiento. Para la ruta o dirección del canal utiliza un hidrograma de escurrimiento usando el método de Att-Kin, el intervalo y largo del alcance deben ser especificados por el usuario.

El método Att-Kin es un procedimiento modificado del SCS dirección –alcance (extensión-distancia) consta de dos pasos hidrograma de escurrimiento a través de un reservorio y la dirección por medio de la onda-cinemática.

Puede contener hasta 99 estructuras y 200 extensiones del canal, 9 distribuciones de lluvia diferentes y 10 tormentas por distribución, combina hidrogramas para un gran número de tributarios, divide hidrogramas, almacena hasta 7 hidrogramas computados en cualquier momento.

Este modelo es aplicable donde los picos de flujo son el resultado de tormentas eléctricas, altas intensidades, cortas duraciones. El deshielo es considerado como flujo base o interflujo. Para cuencas de 5 a 1000 km<sup>2</sup> con áreas de subcuenca de 0,25 a 25 km<sup>2</sup>.<sup>7</sup>

1.2.3.3 SWMM. Desarrollado en 1970, bajo un consorcio que trabajaba bajo el auspicio de la agencia de protección del medio ambiente (EPA). Es capaz de representar el escurrimiento de tormenta de agua urbana y combinar el derrame de alcantarilla. Simula eventos de tormenta sobre las bases de entradas de lluvia (hietograma), la caracterización del sistema (desagüe, conducción, almacenaje, tratamiento y agua recibida) y predice las salidas en forma de cantidad de agua. La simulación es la representación del sistema prototipo, facilita la interpretación del modelo, identifica instrumentos reparadores y otros fenómenos locales. Describe efectos temporales y espaciales.

Tiene como entradas: escurrimiento de superficie basado en hietogramas de lluvia arbitrarios, humedad antecedente, uso de la tierra y topografía. El flujo sanitario de tiempo basado en el uso de tierras, densidad de población, entre otros. La infiltración dentro del sistema de alcantarillado basado en niveles de agua subterránea y la condición del alcantarillado.

En el núcleo central el transporte es donde lleva y combina entradas a través del sistema de alcantarillado, haciendo uso de la onda cinemática, continuidad del agua y las ecuaciones de Manning. Como instrumentos de corrección modifica hidrogramas, polutogramas en puntos seleccionados, indica: tiempo de retención y eficiencia del tratamiento.

---

<sup>7</sup> Ibid., p 413-416

Como efecto dirige los hidrogramas y polutogramas a través de aguas recibidas (corriente, río, lago, estuario). El SWMM está asociado en 4 bloques: entradas; genera superficies de escorrentía basado en hietogramas arbitrarios, condiciones de humedad antecedente, uso del suelo, topografía. Para las aguas residuales genera el sentido, dirección del flujo y tiene en cuenta pérdidas por infiltración debido a lluvia en áreas permeables, detención en superficie flujo terrestre, flujo de canal y contaminantes colados, dando como resultado hidrogramas de entrada y polutogramas. Además, tiene subrutinas para entrar y salir, para leer el hietograma de lluvia y la información del desagüe configura una orden para canales de acuerdo aguas arriba y abajo, computa la coordenada del hidrograma para cada periodo de tiempo, calcula el flujo de salida desde los subdesagües, computa contribuciones (subdesagües, polvo, erosión), da la profundidad de agua subterránea instantánea valor de flujo y dirección.<sup>8</sup>

Combina el flujo terrestre y el flujo de cañería. Subdesagües (terrestre), canal, cañería (especial de canal) pueden ser los elementos hidráulicos posibles con parámetros como tamaño, inclinación, coeficientes de dureza, entre otros. El subdesagüe recibe lluvia, tiene en cuenta pérdidas por infiltración y permite almacenamiento o retención. Dependiendo el tamaño del sistema el punto aguas abajo puede ser un vertimiento o desembocadura, para un sistema más grande este punto puede ser el inicio del transporte. Se identifican los límites, las entradas grandes de agua y geometría de la red de alcantarillado.

Los parámetros necesarios para identificar las características hidráulicas de los subdesagües son: área de superficie, ancho del flujo terrestre, declive del suelo, coeficientes de dureza, profundidades de detención, infiltración, porcentaje de impermeabilidad. Con lo anterior y un valor de lluvia dado se determina: profundidad agua transitoria, flujo de salida. Los valores de rugosidad son tomados con base en la condición de las superficies presentes. Para la infiltración se pueden usar tablas. Los valores de los periodos de tiempo son estimados por la ecuación de infiltración de Horton.<sup>9</sup>

La desratización del tiempo puede variar de 1 a 30 minutos dependiendo la intensidad de la lluvia. El área permeable debe aportarse o por defecto tomara 25%. Se debe tener una buena idea de las variaciones espaciales y temporales de la lluvia.

1.2.3.4 SSARR. Síntesis de la corriente de escurrimiento y regulación del reservorio (SSARR). Se ha venido aplicando desde 1956, desarrollado para el

---

<sup>8</sup> Ibid., p 416-420

<sup>9</sup> JIMENEZ AVELLA, Wilson Alejandro. Instrumentación y análisis de la variación espacial y temporal de la precipitación en la respuesta de una cuenca urbana. caso de estudio campus Universidad Nacional sede Bogotá. Tesis de Maestría. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2008. P 36-42.

planeamiento, diseño y operación de trabajos de control de agua por la Armada de los Estados Unidos en el río Columbia. Se ha utilizado para modelar varios ríos en Estados Unidos. Puede obtener flujos en las cabeceras de las cuencas partiendo de la lluvia, acumulación de nieve o deshielo, los flujos de corriente se obtienen por efectos dirección canal, desviaciones y regulación de reservorio.

El modelo de cuenca tiene en cuenta los siguientes procesos: intercepción, evapotranspiración, humedad del suelo, infiltración de flujo base, dirección de escurrimiento en la corriente, escurrimiento del deshielo. El río y modelo de regulación del reservorio dirige flujos de corriente de arriba hacia abajo a través de canal y almacenaje también flujo a través de reservorios bajo condiciones controladas. El intervalo de tiempo puede ser de 0.1 horas a 24 horas dependiendo del modelado y otros factores (área drenaje, tiempo respuesta hidrológica, disponibilidad de datos hidrológicos)

La aplicabilidad de este modelo es para escurrimiento y proyección de flujo de corriente, estudios a largo plazo (respuesta hidrológica). Realiza análisis de operaciones en reservorios, simulación de tormentas de diseño (sintéticas), análisis de diversos flujos de corriente (riegos), flujo de corriente en un punto del río, proyecto de flujo de corriente estacional. Utiliza la cascada de reservorios lineales.

El requerimiento de datos es de la siguiente manera; características constantes: área de drenaje, capacidad de almacenaje, configuración del sistema. Condiciones iniciales: índices de la cuenca, flujos iniciales, reservorio inicial, elevaciones de los reservorios, flujo de salida. Series de tiempo: precipitación, temperatura, flujo de corriente, regulación de reservorio. Control del trabajo: periodo computación, intervalo de tiempo, instrucciones de entrada y salida.

Ofrece los siguientes modelos de cuenca: curva-depleción el cual simula el deshielo de la nieve utilizando una curva de depleción relacionando porcentaje de escurrimiento estacional al porcentaje de área cubierta de nieve. Modelo de cuenca banda de nieve, simula continuamente la acumulación de nieve y escurrimiento de lluvia, para proyectos de escurrimiento a corto plazo.

Este modelo ha sido utilizado en cuencas de gran tamaño como la de Salt River en Arizona, río Alto en Paraguay, ríos en Brasil y el río Mekong.<sup>10</sup>

1.2.3.5 Modelo de cuenca STANFORD (SWM). Desarrollado por la universidad de Stanford a principios de los 70. Sintetiza las corrientes de flujo por hora o diariamente a la salida de la cuenca. Ha servido como base para varios modelos desarrollados posteriormente. Los datos de entrada consisten en la precipitación y evapotranspiración potencial si hay deshielo se necesita de datos adicionales.

---

<sup>10</sup> PONCE. Op. Cit. P 420-431.

En la precipitación tiene en cuenta la humedad del suelo y el hielo presente. La humedad del suelo la divide en tres partes: almacenaje de zona superior, zona inferior y agua subterránea. En la zona superior simula las abstracciones hidrológicas y el escurrimiento resultante de tormentas menores junto con las zonas bajas, en las zonas bajas se tiene en cuenta tormentas mayores, para el agua subterránea tiene en cuenta el flujo base a los canales de corriente. Todo esto resumido en flujo terrestre, infiltración, interflujo y flujo de entrada. La evaporación y evapotranspiración está presente en las tres partes.

El modelo de superficie terrestre tiene los siguientes parámetros; intercepción: depende del evento, tipo de cobertura y el volumen en el almacenaje de intercepción. La humedad entra al almacenaje de intercepción hasta llenar un tope, su evaporación se asume como continua. La precipitación en sitios impermeables se asume que contribuye al escurrimiento de superficie para áreas conectadas a un canal. Para áreas no conectadas se tiene en cuenta en la infiltración.

La infiltración puede ser directa en la zona baja con almacenaje subterráneo las variaciones espaciales de la infiltración son simuladas por la curva de capacidad de infiltración donde se muestra el área de cuenca acumulativa con una capacidad de infiltración. También existe la infiltración indirecta en la zona superior, simula el almacenaje en depresión, fisuras del suelo y suelos alterados esta no contribuye en la zona baja o en la zona subterránea, contribuirá al interflujo y almacenamiento en la zona alta el almacenaje en la zona alta no depende de la intensidad. La humedad desaparece en la zona alta por evapotranspiración y percolación hacia una zona más baja.

La profundidad del flujo terrestre está relacionada con la profundidad del flujo de salida y la altura de flujo de salida está relacionada con el volumen de la superficie de detención.

En un intervalo de tiempo el almacenaje de detención del interflujo tiene que ver con el subproducto de infiltración directa. Las pérdidas en el almacenaje de detención de interflujo son calculadas en intervalos de 15 minutos.

Para el agua subterránea el flujo de entrada consiste en una infiltración directa y una indirecta. La infiltración directa e indirecta que entra al almacenaje es función del almacenaje en la zona baja. El almacenaje está dividido en el activo que contribuye y el profundo o inactivo que no aporta a la corriente de flujo.

Desde el almacenaje de intercepción y el almacenaje en zona alta ocurre en un valor potencial de evapotranspiración en aguas subterráneas y los de la corriente de superficie son simulados utilizando el concepto de oportunidad de evapotranspiración la cual es una curva, una distribución de frecuencia lineal acumulativa esto aplicado a las zonas bajas.



Para la simulación del sistema canal se utiliza un concepto similar a la unidad hidrográfica de Clark. El hidrograma de salida trasladado es derivado desde el histograma tiempo-descarga y también hace uso del método tiempo-área con una altura de unidad efectiva-lluvia para producir la unidad hidrológica trasladada. Los hidrogramas producidos son transportados a través de un reservorio lineal.<sup>11</sup> Este modelo requiere de 6 a 10 años de lluvia y escurrimiento, esto para obtener una mejor precisión al momento del modelado.

1.2.3.6 Modelo de Sacramento. Es un modelo de simulación continua creado por agencias estatales estadounidenses en 1973 y modificado en 1976. Puede ser utilizado para simular la cabeza de agua del ciclo hidrológico. El modelo consiste en un set de: percolación, almacenaje suelo-humedad, drenaje y evaporación para representar los procesos hidrológicos de manera lógica. El escurrimiento depende del conteo suelo-humedad.

Divide el suelo en dos capas: en la capa superior el almacenaje tiene en cuenta la humedad retenida en la intercepción, la inferior tiene en cuenta el volumen de humedad del suelo y el almacenaje del agua subterránea. Estas dos capas tienen dos subalmacenajes uno ligado al agua en el suelo y la segunda las que están libres y pueden moverse.

Tiene en cuenta dos partes de la cuenca, área permeable que produce escurrimiento después de cierta cantidad de agua y las áreas impermeables que están conectadas al canal, la cual produce escorrentía con una precipitación mínima.

Para el cálculo de la evaporación y evapotranspiración hace uso del concepto de potencial de evapotranspiración con base en datos meteorológicos ajustando esto a las diferentes cubiertas del suelo permeable y no permeable.

El escurrimiento es el resultado de la precipitación, este modelo lo puede representar de 5 maneras:

- Escurrimiento desde áreas impermeables variables.
- Escurrimiento de superficie cuando la velocidad de percolación es lenta.
- Interflujo por drenaje lateral.
- Flujo base suplementario.
- Flujo base primario

Los últimos 4 maneras de escurrimiento tienen que ver con el flujo en las zonas en que divide el suelo el modelo, en su mayoría son flujos laterales. La curva de

---

<sup>11</sup> PONCE. Op. Cit. P431-442

demanda de evapotranspiración involucra 17 parámetros que puede ser definida en una gráfica con 12 ordenadas calculada con una ecuación con 5 parámetros.<sup>12</sup>

### 1.3 RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES.

1.3.1 Estaciones hidrológicas urbanas. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) las variables climatológicas de un área urbana no son posibles de representar de forma global mediante la implementación de una sola estación hidrometeorológica, debido a la no uniformidad de los centros urbanos, ocasionada por el propio ordenamiento territorial, característico y necesario en cualquier urbe, con presencia de zonas urbanas, áreas destinadas al uso residencial, comercial, industrial, recreacional, entre otros.

La no uniformidad es también debida a que cada zona posee características propias de su arquitectura y actividad económica, que afectan ciertas variables climáticas propias de cada lugar, y para las cuales no sería correcto considerar de forma general toda la ciudad. Por ejemplo: en una zona comercial con grandes extensiones destinadas a parqueaderos de automóviles, la temperatura sufriría un aumento considerable debido a la luz solar absorbida por el pavimento, en contraste con una zona de recreación con grandes extensiones de parques, áreas verdes y cuerpos de agua que reflejan los rayos del sol.

Por las razones mencionadas anteriormente es recomendable dividir toda el área de estudio en zonas climáticas urbanas (ZCU), con el fin de recolectar datos representativos y reales de cada una de ellas. La OMM ofrece un método sencillo de clasificación de zonas climáticas urbanas (ZCU) descrito en la Figura 2.

Existe una idea errónea en la implementación de los techos de edificaciones altas, como sitios para el emplazamiento de instrumentos de medición hidrometeorológica. En realidad, los techos de los edificios poseen sus propios microclimas que conducen a resultados erróneos; los edificios generan perturbaciones del viento, además de que se encuentran contruidos con materiales que suelen calentarse mucho en los días despejados y enfriarse demasiado en las noches, también están diseñados para ser impermeables y evacuar grandes cantidades de agua en muy poco tiempo, que a su vez unidos con la radiación y fuertes ráfagas de viento los hace extremadamente secos. Es por esta razón que los techos de los edificios son muy poco adecuados para medir variables como precipitación, temperatura del aire y humedad.

---

<sup>12</sup> PONCE. Op. Cit. 442-447

Figura 2. Clasificación simplificada de distintas formas urbanas organizadas por orden decreciente aproximado de su capacidad para afectar al clima local (Oke, 2004, sin publicar).

Zona climática urbana <sup>a</sup>	Imagen	Clase de rugosidad <sup>b</sup>	Relación de aspecto <sup>c</sup>	% construido (impermeable) <sup>d</sup>
1. Zona urbana intensamente construida con edificios muy juntos de gran altura con revestimiento, por ejemplo, torres del centro		8	> 2	> 90%
2. Zona urbana densamente construida con edificios de entre dos y cinco plantas, adosados o muy juntos, a menudo de ladrillo o piedra, por ejemplo, el centro histórico de la ciudad		7	1,0-2,5	> 85
3. Zona urbana muy construida, densidad media con viviendas, locales y apartamentos en fila o unifamiliares, pero muy juntos, por ejemplo, edificaciones urbanas		7	0,5-1,5	70-85
4. Zona urbana construida, densidad media de grandes edificios bajos y estacionamientos pavimentados, por ejemplo centros comerciales, almacenes		5	0,05-0,2	70-95
5. Zona suburbana de construcción media de una o dos plantas, por ejemplo, viviendas suburbanas		6	0,2-0,6 hasta > 1 con árboles	35-65
6. Uso mixto con grandes edificios en paisaje abierto, por ejemplo, instituciones como hospitales, universidades, aeropuertos		5	0,1-0,5 depende de los árboles	< 40
7. Desarrollo semirural, viviendas dispersas en zonas naturales o agrícolas, por ejemplo, granjas, fincas		4	> 0,05 depende de los árboles	< 10

Edificios      Vegetación  
 Terreno impermeable    Terreno permeable

Fuente: Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. OMM. 2008. Actualizado en 2010.

Cabe recordar que en este estudio tendremos en cuenta las variables concernientes a la cantidad del recurso hídrico y no a su calidad, lo que comprende las siguientes variables: evaporación, radiación, precipitación, velocidad y dirección de viento, presión atmosférica, temperatura del aire, y humedad del mismo. A continuación, describiremos las recomendaciones más importantes de la OMM para la medición de cada una de las variables ya mencionadas.

1.3.1.1 Temperatura del aire. Los instrumentos utilizados para la medición de la temperatura en zonas rurales también sirven para efectuar mediciones en zonas urbanas, teniendo en cuenta ciertas recomendaciones como la protección contra la radiación, debido a que el instrumento puede estar situado cerca de un muro de

un edificio que refleje la luz del sol, o vehículos con motor en marcha; también se recomienda la ventilación forzada en áreas en las que el apantallamiento no permita la libre circulación del aire.

La superficie sobre la que se mida la temperatura del aire deberá ser típica de la ZCU, se recomienda que se centre la garita a una distancia de  $Z_H/W$  de cualquier edificio; donde  $Z_H$  es la altura media de los edificios y  $W$  es el ancho de la calle que los separa. También se recomienda que se instale el equipo por encima de  $1.5 Z_H$ , si fuera posible, para evitar horas de exposición a la sombra, proteger al equipo de la contaminación debida al polvo y una mayor dilución del calor emitido por los vehículos. No se recomienda que se instale el equipo cerca de techos, ya que están diseñados para aislar el calor hacia el interior del edificio, lo que los hace aumentar mucho su temperatura durante el día y disminuir demasiado en las noches.

1.3.1.2 Velocidad y dirección del viento. “Las mediciones de la velocidad y dirección de viento son muy sensibles a las distorsiones del flujo a causa de los obstáculos, perturbaciones del flujo en tornos a grupos de árboles y edificios, y a árboles y edificios individuales, e incluso alteraciones inducidas por el grueso de la torre o del soporte al que va fijado el instrumento”<sup>13</sup>. Para distritos urbanos con viviendas unifamiliares de máximo 2 plantas (ZCU 6 y 7), se puede utilizar un anemómetro a una altura de 10 m, y situado a una distancia de cualquier obstáculo de 10 veces su altura desde el anemómetro, y que no midan más de 6 m de altura.

En distritos más densamente edificadas y alturas mayores y relativamente uniformes, se deberá ubicar el anemómetro a una altura de  $1.5 Z_H$  en un mástil de construcción abierta. Lo anterior conlleva a que el emplazamiento de los anemómetros tendría que estar por lo general en una ubicación distinta a los demás sistemas de medición.

Se pueden utilizar anemómetros mecánicos de cazoletas, recomendando un mantenimiento más frecuente debido a la contaminación de la atmósfera que podría afectar más rápidamente los engranajes a causa de la corrosión.

1.3.1.3 Presión atmosférica. “A escala de un área urbana probablemente no será necesario monitorizar la presión atmosférica cuando exista ya una estación sinóptica en la región”<sup>14</sup>. Si es necesario incorporar sensores de presión atmosférica serán aplicables las recomendaciones de las áreas rurales.

---

<sup>13</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Velocidad y dirección del viento. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

<sup>14</sup> Ibid., p.II.11.3.3

Si se instala un sensor en un edificio es posible que haya diferencias de presión debido a ráfagas de viento, o diferencias entre el interior o exterior del sensor en una habitación donde existan sistemas de aire acondicionado.

1.3.1.4 Precipitación. Se recomienda que el emplazamiento de los pluviómetros se haga en espacios abiertos, como parques sin libre de barreras y con poca densidad de árboles, o en aeropuertos urbanos.

En áreas donde no sea posible el emplazamiento en campos abiertos, se recomienda que el pluviómetro se instale sobre mástiles suficientemente altos por encima de los techos de las edificaciones ( $1.5 Z_H$  desde el nivel del suelo); donde las turbulencias ocasionadas por el edificio no afecten al pluviómetro. Lo anterior conlleva a que “el pluviómetro estará expuesto a velocidades de viento superiores a lo normal, por lo que el error de estimación será mayor que en las proximidades de la superficie, y los datos proporcionados por el medidor deberán ser corregidos”<sup>15</sup>; para lo que se aconseja que las mediciones de viento se realicen sobre el mismo mástil.

Para los hidrólogos tiene especial interés los periodos de fuertes lluvias, por lo que sería aconsejable la instalación de pluviómetros de cubeta basculante o de pesaje, aunque podrían también beneficiarse de pluviómetros ópticos o los radares.

1.3.1.5 Radiación. Según la OMM “cuando las estaciones se hallan en la zona edificada, probablemente se medirá solo la radiación solar entrante (global), y no se observarán ni las radiaciones entrantes de onda larga, ni los flujos con componentes salientes”<sup>16</sup>. Esto se debe a que los emplazamientos para medir la radiación suelen estar situados en áreas rurales, donde los aerosoles y la contaminación atmosférica no afecten sus mediciones. Por lo que las recomendaciones para la medición de la radiación en las áreas urbanas serán las mismas que para las zonas rurales.

1.3.1.6 Evaporación. Según la OMM no es recomendable utilizar instrumentos convencionales para la medición de la evaporación en zonas urbanas, debido a que para una buena toma de datos de evaporación se recomienda que las mediciones de la evaporación se realicen en un emplazamiento representativo de la zona de medición; con obstáculos a una distancia no inferior a cinco (5) veces su altura, o diez (10) veces, si se encuentran agrupados; los emplazamientos no deben estar situados sobre concreto o asfalto, ni excesivamente a la sombra, ni tampoco cerca de superficies duras que puedan generar salpicaduras, lo que no es una característica de las zonas representativas de las áreas urbanas.

---

<sup>15</sup> Ibid., p.II.11-17

<sup>16</sup> Ibid., p.II.11.3.7

Para la medición de la evaporación la OMM recomienda métodos indirectos como el método de limitación de ozono (OLM), el modelo HPDM o el sistema LUMPS; dichos métodos requieren observaciones representativas de la radiación solar entrante, la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento, y unas estimaciones generales como el albedo, la emisividad, la longitud de rugosidad y las fracciones del distrito urbano pobladas de vegetación, edificadas o irrigadas.

1.3.1.7 Humedad. Los instrumentos utilizados para la medición de la humedad en áreas rurales son aplicables también a las áreas urbanas, de igual modo son aplicables las recomendaciones de emplazamiento para los instrumentos medidores de la temperatura antes vistos, como la elevación a la que se debe ubicar el instrumento 1.5  $Z_H$ , su centro en  $Z_H/W$  de cualquier edificio, así como las recomendaciones de ventilación forzada y para evitar el apantallamiento.

Adicionalmente se sabe que los entornos urbanos son más sucios, debido a la presencia de aceites, polvo, y contaminantes; que pueden degradar mucho más rápido los higrómetros lo que conlleva a un mantenimiento más cuidadoso de los mismos.

1.3.2 Estaciones meteorológicas no urbanas. A continuación, se mencionan los requisitos generales del emplazamiento de una estación hidrometeorológica rural, según la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos, de la OMM en su edición 2008, y actualizada en 2010. No obstante, sólo nos centraremos en las variables a tener en cuenta en este estudio, ya mencionadas (evaporación, radiación, precipitación, velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad).

Algunas de las Recomendaciones generales a tener en cuenta en los emplazamientos rurales son:

- Los instrumentos deberán ser instalados en una superficie llana con una dimensión mínima de 25 metros por 25 metros cuando haya muchos instrumentos, pero en los casos en los que sean pocos, se podrá utilizar un área de 10 metros por 7 metros. El terreno deberá estar cubierto por pasto o hierba corta representativa de la zona, y no se deberá realizar el emplazamiento sobre concreto o asfalto.
- No deberán de existir laderas empinadas en los alrededores, y el emplazamiento no debe ubicarse en hondonadas.
- El emplazamiento debería estar suficientemente alejado de árboles, edificios, muros u otros obstáculos. La distancia entre cualquiera de esos obstáculos (incluidas las cercas o vallas) y el pluviómetro no debería ser

inferior al doble de la altura del objeto por encima del borde del aparato, y preferentemente debería cuadruplicar la altura.

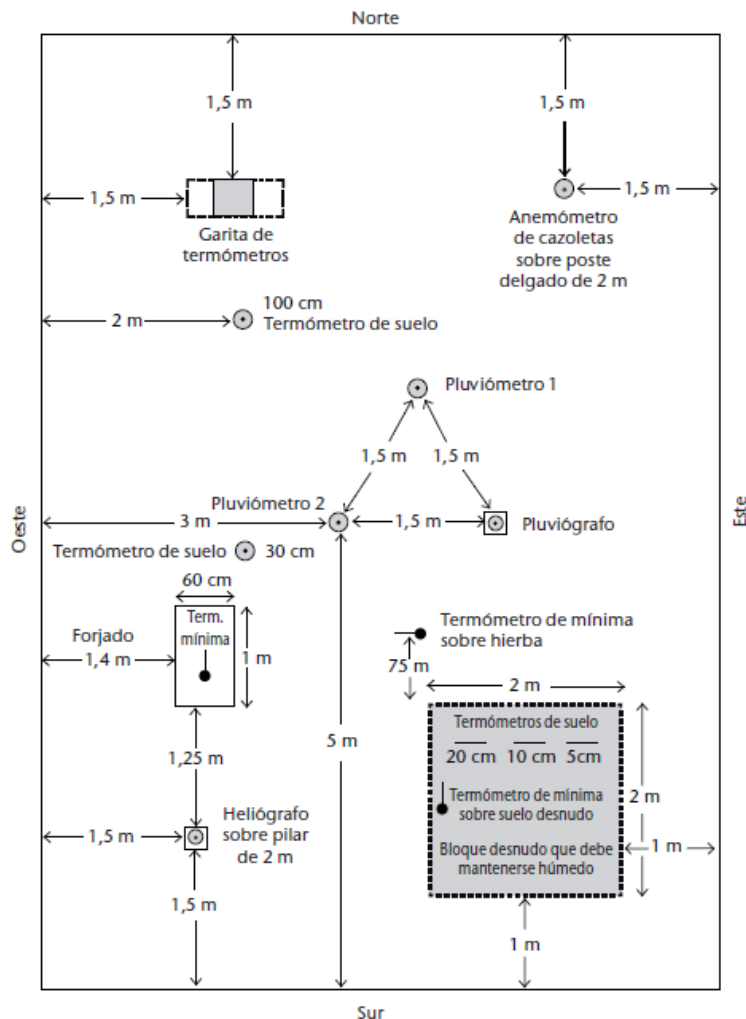
- El registrador de luz solar, el anemómetro y el pluviógrafo, se deberán de instalar de manera que satisfagan los requisitos expuestos más adelante.
- Es probable que el área de emplazamiento no sea el mejor lugar para la medición de la dirección y velocidad del viento, por lo que tal vez sea mejor seleccionar un lugar más expuesto al mismo.
- Si se encuentra en presencia de árboles o edificios a cierta distancia del sitio de emplazamiento de instrumentos que impidan divisar con suficiente amplitud el horizonte, es aconsejable seleccionar otro sitio para las observaciones de luz solar o radiación.

Es evidente que algunas de estas recomendaciones resultan ser contradictorias, para lo cual se buscará una solución intermedia en las recomendaciones específicas para cada variable a medir que se darán a continuación y como se muestran en la figura 3.

1.3.2.1 Temperatura. Una forma de medir la temperatura de un objeto consiste en dejar que el termómetro alcance la temperatura del objeto y luego medir la temperatura de este. Otra se basa en la medición de esta mediante un radiómetro, sin necesidad de alcanzar un equilibrio térmico.

El principio utilizado en la primera técnica se basa en la dilatación térmica; mientras que los termómetros radiométricos se basan en la banda infrarroja del espectro electromagnético, estos últimos son por lo general utilizados para mediciones de la temperatura desde satélites.

Figura 3. Disposición de una estación de observación en el hemisferio norte que muestra las distancias.



Fuente: Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. OMM. 2008. Actualizado en 2010.

- **Emplazamiento.** Los termómetros deberán estar situados a una altura de entre 1,2 m y 2 m por encima del nivel del suelo, debido a que en las capas más bajas de la atmósfera pueden darse importantes gradientes de temperatura. También deberán estar cubiertos por una garita que lo proteja de la radiación, la precipitación y que permita la circulación libre del aire.
- **Termómetro (de estación) ordinarios.** Estos termómetros son los más exactos de todos los de uso meteorológico, y su escala está calibrada a intervalos de 0,2 K y 0,5 K, y su escala es más amplia que la de los otros termómetros. Se utiliza cubierto por una garita y sobre un soporte que lo mantiene en posición vertical, y con el bulbo en el extremo inferior; que puede ser de forma cilíndrica o de cebolla.



- Termómetros de máxima. El tipo de termómetros de máxima recomendado por la OMM es el de mercurio en cápsula de vidrio, con un estrechamiento en entre el bulbo y el comienzo de la escala que permita que el mercurio no descienda en temperaturas mínimas.  
Estos termómetros deberán ser instalados con un ángulo de 2 grados con respecto a la horizontal, con el bulbo en el extremo inferior, con el fin de que la gravedad haga que el mercurio se apoye en el estrechamiento sin que este lo atraviese.
- Termómetros de mínima. El termómetro más común es el de alcohol con un índice de vidrio oscuro, de unos 2 cm sumergidos en el alcohol. Es recomendable dotar estos termómetros con una cámara de seguridad en su extremo superior, de un tamaño suficiente para que el aparato pueda soportar temperaturas de 50 °C sin que se dañe.  
Deberá disponerse homológamente a los termómetros de máxima en una posición casi horizontal. También se recomienda que el alcohol esté libre de impurezas; en el caso del alcohol etílico este deberá estar completamente libre de acetona.
- Termómetros eléctricos. Son muy utilizados actualmente en meteorología. Su principal virtud radica en su capacidad de proporcionar una señal de salida adecuada para indicar, registrar, almacenar o transmitir a distancia datos de temperatura. Los más utilizados son las resistencias eléctricas, los termómetros de semiconductor, termistores y los termopares.

1.3.2.2 Presión atmosférica. “La presión atmosférica sobre una superficie dada es la fuerza por unidad de área que ejerce sobre dicha superficie el peso de la atmósfera que se encuentra encima”<sup>17</sup>. El instrumento utilizado para la medición de la presión atmosférica es el barómetro que pueden ser de varios tipos como: los barómetros de mercurio, eléctricos, digitales piezorresistivos, de resonador cilíndrico, aneroides, y los de registro automático también llamados barógrafos.

- Emplazamiento. Aunque como ya se mencionó anteriormente se pueden encontrar varios tipos de barómetros, existen recomendaciones generales para cualquiera que sea el instrumento utilizado en la estación de observación como son: temperatura uniforme, buena iluminación, ausencia de corrientes de aire, montaje sólido y vertical, y protección contra manejos bruscos. En sí, el instrumento debería estar colgado o instalado en un recinto donde la temperatura sea constante o cambie lentamente, y en el que no se produzcan gradientes de temperatura. También debería estar protegido en todo momento de los rayos directos del sol, y tendría que estar situado lejos de cualquier aparato de calefacción y de las corrientes de aire.

---

<sup>17</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la presión atmosférica. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

- Barómetros de mercurio. Existe una gran tendencia a abandonar los barómetros de mercurio por muchas razones; como que el mercurio es altamente tóxico, son instrumentos muy delicados y difíciles de transportar, también lo es su mantenimiento y, además ya se cuenta con otros instrumentos de presión y exactitud equivalente, provistos de lectura electrónica. Es por estas razones que no nos adentraremos en estos equipos, ya que no son tan viables.
- Barómetros electrónicos. La mayoría de los nuevos barómetros están dotados de transductores que transforman la respuesta del sensor en señales eléctricas, ya sean de forma analógica o digital. Con el barómetro electrónico es posible obtener lecturas exactas en un dispositivo de lectura digital, cuya escala está graduada generalmente de hPa, aunque puede ser fácilmente adaptado a otras unidades en caso necesario.
- Barómetros electrónicos piezorresistivos. En los barómetros piezorresistivos digitales se utilizan elementos de cuarzo cristalino, axialmente cargados, que son transductores de la presión absoluta. Sea elegido el cuarzo cristalino por sus propiedades piezoeléctricas, sus características de estabilidad de frecuencia, sus reducidos efectos de temperatura y sus características de frecuencia reproducibles con precisión. Para mantener el barómetro en un modo de funcionamiento aceptable, habrá que verificar las correcciones de calibración aplicadas a las lecturas por lo menos cada año. También se recomienda que el barómetro se encuentre a una temperatura constante preferiblemente a la de calibración.
- Barómetros aneroides. Las principales ventajas de los barómetros aneroides sobre sus parientes de mercurio; son su tamaño reducido, su facilidad de transporte y la ausencia de mercurio en su mecanismo de funcionamiento. Su funcionamiento es basado en una cámara metálica cerrada, en la que se ha hecho un vacío total o parcial, y un sistema de muelles fuertes que impiden el colapso de la misma debido a la presión atmosférica externa. Los muelles ejercen una fuerza de contraposición que equilibra la presión exterior, y mediante un sistema de palancas que multiplican las deformaciones se desplaza un índice sobre una escala graduada que permite la lectura de la presión atmosférica. Otros utilizan un haz de luz sobre dicha escala. Se recomienda que el barómetro aneroides se lea en la misma posición (vertical u horizontal) en la que haya sido calibrado, y antes de su lectura deberá ser ligeramente golpeado.
- Barógrafo aneroides. El principio bajo el cual funciona el barógrafo aneroides es similar al del barómetro aneroides, salvo que se utiliza una plumilla marcadora en vez de un índice, lo que conlleva un cambio en el diseño de la cápsula y, que por lo general se traduce en un aumento de su tamaño.

Su principal recomendación además de las de los barómetros aneroides; consiste en tener un especial cuidado en el mantenimiento de las plumillas, utilizando cápsulas aneroides suficientemente grandes.

1.3.2.3 Humedad. “Las mediciones de humedad en la superficie terrestre sirven para el análisis y la predicción meteorológicos, para los estudios climatológicos y, en general, para muchas otras aplicaciones especiales en hidrología, agricultura, servicios aeronáuticos y estudios medioambientales”<sup>18</sup>

Los instrumentos utilizados para la medición de la humedad son los higrómetros, los cuales se describen de forma resumida en la tabla 4, según la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos de la OMM, capítulo 4.

1.3.2.4 Viento de Superficie. Según la OMM “se considerará que el viento de superficie es fundamentalmente una magnitud vectorial bidimensional representada por la dirección y la velocidad”<sup>19</sup>.

El viento de superficie suele medirse utilizando una veleta y un anemómetro de cazoletas o de hélice, los cuales son los más convenientes según las recomendaciones de la OMM, y no constituyen una lista completa de los instrumentos disponibles.

- Anemómetros de cazoletas y de hélices. Son los instrumentos más comúnmente utilizados para la medición de la velocidad del viento. Constan principalmente de dos componentes, el rotor y el generador de señales, en el que la velocidad angular del rotor de cazoletas o de la hélice es directamente proporcional a la velocidad del viento. Asimismo, presentan una calibración lineal independiente de la densidad del aire.
- Veleta. Es el instrumento encargado de la medición de la dirección del viento. Para una correcta medición es necesario que la veleta esté bien equilibrada, de modo que no adopte una posición de preferencia cuando el eje no sea vertical.
- Otros sensores de viento. Ya que la OMM recomienda los anemómetros de cazoletas, hélices y la veleta como el método más adecuado para la medición del viento, sólo se mencionan otros instrumentos sin su descripción, tales como: anemómetros de tubo de Pitot, anemómetros sónicos, anemómetros de disco caliente, anemómetros de hilo caliente, veletas de placa móvil, y técnicas de teledetección.

---

<sup>18</sup>OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la Humedad. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

<sup>19</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición del viento de superficie. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

- Emplazamiento. Se define una altura estándar de 10 metros por encima del nivel del terreno para el emplazamiento de los anemómetros y veletas.

Tabla 5. Tabla resumen de instrumentos para la medición de la humedad, según OMM.

II INSTRUMENTO	DESCRIPCION	EMPLAZAMIENTO	RECOMENDACIONES
<b>Aspiropsicrómetro de Assmann</b>	Está compuesto de dos termómetros de mercurio montados verticalmente, uno al lado del otro, en un marco metálico cromado o niquelado pulido, conectados por conductos a un ventilador que funciona mediante un resorte o un motor eléctrico. El depósito de uno de los termómetros tiene una mecha de muselina bien ajustada que se humedece con agua destilada antes de utilizar el termómetro.	Las observaciones con el psicrómetro deberían efectuarse al aire libre, manteniendo el instrumento colgado de un gancho o unido por un soporte adecuado a un poste delgado, o manteniéndolo con una mano y el brazo estirado, con los conductos de aires apenas inclinados en dirección del viento. Estos orificios tendrían que encontrarse a una altura de entre 1,2 y 2 metros por encima del nivel del terreno para las mediciones normales de la temperatura y de la humedad del aire.	Se debe hacer todo lo posible para que la presencia del observador y otra fuente cercana de calor o de vapor de agua, como el tubo de escape de un vehículo de motor, no influya en las lecturas. Debería verificarse periódicamente el sistema de ventilación, por lo menos una vez al mes. Sería necesario controlar periódicamente la calibración de los termómetros. Debería efectuarse una comparación con un termómetro de referencia certificado, por lo menos una vez al año.
<b>Psicrómetro de garita</b>	El psicrómetro de garita se compone de dos termómetros de mercurio montados verticalmente en una garita meteorológica. El diámetro de los depósitos es de unos 10 mm. El depósito de uno de los termómetros está cubierto con un manguito bien ajustado que debe sobresalir unos 20 mm del tubo del termómetro.	El emplazamiento se debe realizar sobre una garita que lo proteja de la radiación directa del sol y de los golpes, se debe emplazar a una altura ente 1,2 y 2 m por encima del nivel del suelo.	Se recomienda aspirar artificialmente el aire del psicrómetro de garita. La velocidad del aire aspirado en ambos termómetros será de unos 3 m/s.

Tabla 4. (Continuación)

INSTRUMENTO	DESCRIPCION	EMPLAZAMIENTO	RECOMENDACIONES
<b>Psicrómetro de onda o en noria</b>	Es un pequeño psicrómetro portátil que está compuesto de dos termómetros de mercurio sujetos a una montura robusta provista de un mango que, situado en el extremo opuesto a los depósitos de los termómetros, permite girar rápidamente la montura y los termómetros sobre un eje horizontal.	Su emplazamiento será el mismo aplicado para el Aspiropsicrómetro de Assmann.	En algunos casos, el depósito del termómetro húmedo se protege de los rayos solares con una pantalla; <b>conviene utilizar este modelo para las mediciones meteorológicas.</b>
<b>Psicrómetro calentado</b>	Este instrumento funciona según el siguiente principio: el volumen de vapor de agua contenido en una masa de aire no se altera si esta se calienta. Gracias a esta propiedad, no es necesario mantener un termómetro engelado cuando las condiciones son de congelación.	El instrumento propiamente dicho debería fijarse en el exterior de la garita meteorológica. El orificio de aspiración, donde se mide la temperatura del aire ambiente, debería encontrarse en el interior de la garita.	<b><i>El psicrómetro calentado puede emplearse en estaciones meteorológicas automáticas.</i></b>
<b>Higrómetro de cabello</b>	Algunos incluyen un transductor que proporciona una señal eléctrica y pueden también disponer de una función de linealización de manera que la respuesta global del instrumento sea lineal con respecto a las variaciones de la humedad.	El higrómetro debería colocarse en una garita meteorológica.	Como el amoníaco destruye el cabello, no se deben instalar en proximidades de establos o de plantas industriales que utilicen amoníaco.

Tabla 4. (Continuación)

<b>INSTRUMENTO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>EMPLAZAMIENTO</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>
<b>Higrómetro de punto de rocío con espejo enfriado</b>	El sensor consiste en un delgado espejo metálico de pequeño diámetro (1 a 5 mm), térmicamente regulado mediante un dispositivo de enfriamiento, y un sensor de temperatura fijados al reverso del espejo.	Los criterios de emplazamiento del sensor son iguales a los que se aplican a cualquier higrómetro aspirado.	Se recomienda realizar periódicamente comparaciones con un instrumento de referencia.
<b>Higrómetro de condensación de cloruro de litio calentado (célula de punto de rocío)</b>	El higrómetro de célula de punto de rocío mide la temperatura a la cual la presión del vapor en equilibrio de una solución de cloruro de litio saturada es igual a la presión del vapor de agua ambiente.	El higrómetro debería instalarse el aire libre, en una estructura adecuada que lo proteja de los efectos del viento y de la lluvia. El instrumento necesita también un sistema que permita mantener constante la velocidad del aire aspirado.	El cloruro de litio debería renovarse con regularidad. Esta operación podría realizarse una vez al mes, pero dependerá del nivel de contaminación atmosférica.
<b>Higrómetros eléctricos de resistencia y de capacitancia</b>	Los sensores que se basan en las variaciones de las propiedades electrónicas de materiales higroscópicos se utilizan con frecuencia en la lectura remota de la humedad relativa, <i>y en las estaciones meteorológicas automáticas.</i>	Deberán instalarse en una garita meteorológica siguiendo las instrucciones del fabricante relativas al montaje del sensor propiamente dicho. Es obligatorio utilizar filtros protectores.	Se recomienda mantener el higrómetro en perfecto estado de limpieza.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.2.5 Precipitación. Según la OMM “la precipitación se define como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o del aire y se deposita en el suelo”<sup>20</sup>.

- Pluviómetro. El instrumento más utilizado para las mediciones de precipitación líquida es el pluviómetro; que generalmente consiste en un recipiente abierto de lados verticales, en forma de cilindro recto, y con un embudo.
- Emplazamiento. En general en la medición de la precipitación se debe de tratar de obtener una muestra representativa de la verdadera cantidad de agua caída sobre la zona de estudio, se debe tener en cuenta la distancia de cualquier objeto al medidor, la cual debe ser inferior al doble de su altura por encima de la boca del mismo. Se debe estimar el ángulo vertical medio de los obstáculos, así como trazar un plano de la ubicación, evitar las laderas y los techos de los edificios.

Los mejores emplazamientos suelen ser aquellos en donde existan obstáculos que actúen como eficaces barreras contra el viento en todas las direcciones como: los claros de los bosques o de los huertos, entre los árboles, matorrales o arbustos.

Recomendaciones según “OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la precipitación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p

- Se recomienda que, en zonas con vegetación densa y homogénea, la altura de la vegetación debería mantenerse al nivel de la boca del pluviómetro mediante una poda regular.
- Utilizar paravientos alrededor del pluviómetro con el fin de simular la vegetación en ausencia de esta.
- El tamaño de la boca del colector deberá estar entre 200 a 500 cm<sup>2</sup> y deberá conocerse dicho tamaño con una exactitud del 0,5 por ciento.
- El colector deberá diseñarse de tal modo que la lluvia no pueda salpicar hacia dentro ni hacia fuera, lo que se puede lograr si la pared vertical es bastante profunda, y la pendiente del embudo está suficientemente inclinada (al menos 45°).

---

<sup>20</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la precipitación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.



- El diámetro interior de la probeta debería ir disminuyendo hacia la base con el fin de poder medir pequeñas cantidades de precipitación.
- Las varillas graduadas deberían ser de madera de cedro o de otro material adecuado que no absorba demasiada agua y solo posea un efecto capilar escaso.

1.3.2.6 Radiación. “Según su origen, las magnitudes radiactivas se clasifican en dos grupos: radiación solar y radiación terrestre. La radiación solar es la energía electromagnética emitida por el sol, mientras que la radiación terrestre es la energía electromagnética de onda larga emitida por la superficie de la tierra, por los gases, aerosoles y nubes de la atmósfera”<sup>21</sup>.

Existen varios instrumentos para la medición de la radiación dependiendo del tipo de variable que se desea medir, el campo visual, y la respuesta espectral. Estos instrumentos se mencionan brevemente en la siguiente tabla de la *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos 2008 de la OMM*.

Tabla 6. Instrumentos meteorológicos para medir la radiación.

Clasificación del instrumento	Parámetro que se desea medir	Uso principal	Angulo de visión (estereorradianes)
Pirheliómetro absoluto	Radiación solar directa	Patrón primario.	$5 \times 10^{-3}$ Aprox. $2.5^\circ$ de semiángulo.
Pirheliómetro	Radiación solar directa	Patrón secundario para calibraciones. Red	$5 \times 10^{-3}$ a $2.5 \times 10^{-2}$
Pirheliómetro espectral	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red	$5 \times 10^{-3}$ a $2.5 \times 10^{-2}$
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	Patrón Red	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-2}$ Aprox. $2.3^\circ$ de ángulo total.
Piranómetro	Radiación solar global. Radiación solar celeste difusa. Radiación solar reflejada	Patrón de trabajo Red	$2\pi$
Piranómetro espectral	Radiación solar global en intervalos espectrales de banda ancha.	Red	$2\pi$

<sup>21</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la radiación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

Tabla 6. (Continuación)

Clasificación del instrumento	Parámetro que se desea medir	Uso principal	Angulo de visión (estereorradianes)
Piranómetro diferencial	Radiación solar global neta.	Patrón de trabajo Red	$4\pi$
Pirgómetro	Radiación de onda larga ascendente. Radiación de onda larga descendente	Red	$2\pi$
Pirradiómetro	Radiación total.	Patrón de trabajo	$2\pi$
Pirradiómetro diferencial	Radiación total neta.	Red	$4\pi$

Fuente: Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. OMM. 2008. Actualizado en 2010.

Para fines aplicables a la hidráulica e hidrología que son los campos a los que va dedicado el presente estudio, el tipo de radiación a tener en cuenta es la radiación solar directa en la cual nos enfocaremos.

- Pirheliómetro. Para la medición de la radiación solar directa se utilizan pirheliómetros, que constan básicamente de unas superficies receptoras que están dispuestas de tal modo que sean perpendiculares a la dirección del sol.
- Emplazamiento y recomendaciones. El principal requisito para el emplazamiento de los instrumentos de medición de radiación solar directa es la ausencia de obstrucciones para el haz solar en todo momento y en cualquier época del año. Además, la selección del emplazamiento debería efectuarse de modo que la influencia de la niebla, el humo y la contaminación atmosférica sea lo más representativa posible del área circundante. Adicionalmente, se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:
  - Que el pirheliómetro esté instalado de modo que permita un ajuste rápido y gradual del ángulo acimutal y de elevación.
  - Para realizar registros continuos, se aconseja utilizar un equipo de seguimiento automático del sol (seguidor solar).
  - Para las observaciones continuas se debe utilizar una ventana que proteja el sensor y los elementos ópticos de la lluvia, la nieve, etc.
  - Deberá procurarse que la ventana se mantenga limpia, sin que se forme condensación en su parte interior.

1.3.2.7 Evaporación. “Evaporación: Cantidad de agua que se evapora de una superficie de agua libre o del terreno”<sup>22</sup>

Actualmente es imposible medir de forma directa la evaporación o la evapotranspiración, sin embargo, se han desarrollado métodos indirectos basados en mediciones puntuales y otros cálculos que arrojan resultados aceptables.

Los evaporímetros, entre los que se distinguen los atmómetros y las cubetas o los tanques de evaporación, sirven para medir la pérdida de agua en una superficie saturada estándar.

Los evapotranspirómetros (o lisímetros) son recipientes que se instalan bajo la superficie del suelo y se rellenan de tierra en la que pueden cultivarse vegetales. Se trata de dispositivos que permiten estudiar diferentes fases del ciclo hidrológico en condiciones naturales.

- Atmómetros. Es un instrumento que mide la pérdida de agua de una superficie porosa mojada, que puede estar hecha de esferas, cilindros o láminas de cerámica porosa, o discos de papel de filtro, todos saturados de agua. Aunque se considera que los atmómetros proporcionan una medida relativa de la evaporación de la superficie de las plantas, no se recomienda que se utilicen estos instrumentos para evaluar los recursos hídricos si se dispone de otros datos.
- Evaporímetros de cubeta y tanques de evaporación. Existen varios tipos de cubetas y tanques de evaporación entre los que se destacan la cubeta estadounidense de clase A, la cubeta rusa GGI-3000 y el tanque ruso de 20 m<sup>2</sup>. Estos instrumentos funcionan bajo el mismo principio y básicamente su mayor diferencia entre ellos es el diámetro, profundidad y elevación sobre el nivel del suelo.
- Cubeta estadounidense de clase A. Está constituida por un cilindro de 25,4 cm de profundidad y 120,7 cm de diámetro. El fondo de la cubeta se coloca a una altura de 3 a 5 cm por encima del nivel del terreno, sobre un marco de madera que sirve de plataforma.
- Evaporímetro ruso de cubeta GGI-3000. Tiene una superficie de 3000 cm<sup>2</sup> y una profundidad de 60 cm. Es enterrado dejando su borde a 7,5 cm por encima de la superficie del suelo.
- Tanque ruso de 20 m<sup>2</sup>. Es de forma cilíndrica y con fondo plano, este tanque tiene una superficie de 20 m<sup>2</sup>, un diámetro de aproximadamente 5 m y una profundidad de 2m. Está construido en láminas de hierro soldadas de

---

<sup>22</sup> OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la evaporación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p

4 a 5 mm de espesor, se entierra dejando que el borde sobrepase 7,5 cm de la superficie del suelo. La OMM ha recomendado adoptar el tanque ruso de 20 m<sup>2</sup> como evaporímetro de referencia internacional.

- **Emplazamiento y recomendaciones.** Las estaciones para la medición de la evaporación deben situarse en emplazamientos relativamente planos, libres de obstáculos como árboles, edificios, arbustos refugios para instrumentos, etc. Si existe presencia de obstáculos pequeños, deberán estar a una distancia mínima de cinco (5) veces su altura; a diez (10) veces su altura, si se trata de un grupo de obstáculos. El terreno debe estar vallado para proteger los instrumentos e impedir que los animales puedan ingresar a beber de la cubeta, pero deberá estar construida de forma que no afecte el régimen de viento sobre la cubeta.

Se recomienda que la capa del terreno que se ha elegido como emplazamiento de la estación de evaporación se mantenga en un estado lo más cercano posible a su estado natural con respecto zona circundante. La hierba, la maleza, etc. Deberían cortarse a menudo para que no sobrepasen el borde de las cubetas enterradas (es decir, 7,5 cm).

#### 1.4 RECOMENDACIONES INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM)

Las siguientes recomendaciones se obtienen directamente del “*PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL AGUA*”, emitido por el IDEAM en el año 2007.

1.4.1 Niveles. “Se denomina nivel de agua en una corriente (rio, quebrada, arroyo, caño) o en un cuerpo de agua (ciénaga, lago, laguna, embalse), a la elevación o altura de la superficie del agua en un punto determinado, el cual está ligado topográficamente a un origen de referencia identificado con una cota arbitraria o al nivel medio del mar”<sup>23</sup>

Existen varios instrumentos utilizados para realizar la medición directa de niveles como la mira hidrométrica o limnómetro, máxímetro y limnicontacto.

1.4.1.1 Mira hidrométrica o limnómetro. Son básicamente reglas graduadas, embebidas dentro del cuerpo de agua; del que se toma la lectura del nivel por contacto directo con la mira. Pueden estar construidas en distintos materiales como hierro fundido, con la numeración en alto relieve prolongando su durabilidad; en lámina esmaltada, para corrientes que no tengan mucho arrastre de rocas o

---

<sup>23</sup> IDEAM, Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. Observación y Medición en Aguas Superficiales de Niveles, Caudales y Sedimentos. Imprenta Nacional de Colombia, 2007. 162p.

empalizadas que puedan afectar su integridad; o lámina pintada, de muy poca durabilidad, pero muy fácil y económica de construir.

- Emplazamiento y recomendaciones. Se deben instalar sobre la orilla próxima al sector más profundo del cauce, cuidando que la cota cero quede 0,5 metros por debajo del fondo del cauce en ríos pequeños, y 0,5 metros por debajo del nivel de aguas mínimas, en ríos grandes. Su extremo superior deberá estar por lo menos 1 metro por encima del nivel máximo registrado históricamente.

Para la instalación de las miras se recomiendan los siguientes requerimientos técnicos:

- Buena fijación. Se debe garantizar que no se produzcan movimientos verticales de la mira, esto se puede lograr anclándolas sobre rocas, pilas de puentes, muelles u otras estructuras resistentes. Al no contar con alguna de estas estructuras se deberán instalar sobre rieles, perfiles de acero, o anclar a muros de concreto contruoidos para tal fin.
- Fácil operación. Se debe instalar la mira de tal modo que su lectura sea fácil, segura y precisa.
- Referenciación. El plano cero de la mira debe estar referenciado a un (BM) que en lo posible esté ligado a la red de nivelación del IGAC.

En cuanto a su mantenimiento se puede atender a las siguientes recomendaciones:

- Visitar periódicamente la estación limnimétrica para observar su estado físico, y para la recolección de datos.
- Verificar la posición de la cota cero y los empalmes de los diferentes tramos de la mira.
- Cambiar los tramos que se encuentren averiados en especial cuando la pintura o el esmalte hagan borrosa y difícil la lectura.

1.4.1.2 Máxímetro. Son en esencia limnímetros cuya diferencia consta en estar diseñados para registrar el nivel máximo alcanzado por el agua. Según el IDEAM dependiendo del tipo de máxímetro, su funcionamiento consiste en que el agua puede depositarse en un conjunto de recipientes que se encuentran colocados dentro de un tubo con perforaciones laterales que permiten la entrada del agua, puede borrar una señal previamente pintada o dejar una huella (corcho) adherida a las paredes interiores de un tubo.

- Emplazamiento y recomendaciones. Se instala generalmente a continuación del penúltimo metro de mira, debe ligarse topográficamente al mismo punto de referencia de las miras y el cero (0) del máxímetro debe coincidir con un valor del limnímetro que sea múltiplo de 0, es decir, 3.50, 4.00, 4.30, etc.

Su mantenimiento es bastante sencillo, se recomienda:

- Que los recipientes estén en buen estado.
- Después de una creciente se debe lavar el tubo y los vasos para evacuar el sedimento depositado.
- Remarcar la placa de tiza o cal si es el caso.
- En el caso de los máxímetros de huella (corcho), se lavan y se aplica la sustancia molida.

1.4.1.3 Limnicontacto. “El limnicontacto o sonda indicadora de nivel, es un dispositivo simple constituido esencialmente por una polea, un contrapeso y un flotador unidos por un cordel o cable abscisado para facilitar la medición. Según el nivel del agua el cable se desplaza con relación a un punto de referencia, permitiendo así obtener la lectura de nivel”<sup>24</sup>.

- Emplazamiento. La instalación del limnicontacto se hace por lo general en las barandas de los puentes. El sitio elegido para el contacto del flotador con el agua debe estar alejado de la línea de máximas velocidades, para evitar la inclinación del cable por el arrastre del flotador.

NOTA: existen varias clases de limnicontacto entre los que se destacan el de sonda Luminosa o eléctrica y la sonda de Presión, en los cuales no nos adentraremos.

1.4.1.4 Observaciones de registro continuo. Se han diseñado equipos que permiten el registro continuo denominados limnógrafos, los cuales tienen un alto costo de instalación y operación, pero que por su eficacia y exactitud han sido indispensables en la recolección de datos. Sin embargo, las entidades oficiales y empresas privadas han emprendido la implementación de esta tecnología, horrando costos operativos de procesamiento de datos, y disponiendo de la información de manera más oportuna en tiempo real, con base en sistemas telemétricos.

1.4.1.5 Limnógrafo mecánico. “es un equipo que registra continuamente los niveles de agua en el transcurso del tiempo y está conformado fundamentalmente por tres dispositivos: el primero corresponde al elemento sensible, que puede ser un

---

<sup>24</sup> Ibid., p. 27.

flotador y contrapeso o un manómetro, el segundo es el sistema que traduce a escala y registra los niveles del agua, y el tercero proporciona una escala de tiempo, basado en un mecanismo de relojería y alimentado mecánicamente o por baterías”<sup>25</sup>.

1.4.1.6 Limnígrafo digital. Básicamente se hace un acople a los instrumentos registradores de un sistema automático que consta de un decodificador, un panel de sensores y una antena con alimentación de una batería, que es recargada a través de un panel solar, luego el dato colectado es transmitido a intervalos de tiempo (cada 4 horas) al satélite y este lo envía a una plataforma central de recepción instalada convenientemente en oficinas.

- **Emplazamiento.** Las estructuras deben estar situadas en la orilla más cercana a la profundidad máxima del cauce. Debe estar acompañada de un sistema de miras para su control y calibración. Existen tres categorías o tipos de instalaciones limnigráficas: de tubo, de pozo y neumáticos.

**Instalaciones de tubo.** Se instala directamente en el cauce del río sobre paredes verticales ya sea de roca, concreto o ladrillo, que son protegidas de la fuerza de la corriente por una aleta construida dentro del cauce del río.

**Instalaciones de pozo.** Es una excavación realizada a la orilla del río, cuando estas son bajas e inclinadas y no es posible realizar una instalación de tubo.

**Neumáticos.** Son las más costosas de todas, y son la última opción al no poder realizar ninguna de las instalaciones anteriores. Se empotra el tubo en un bloque de concreto que descansa directamente en el lecho del río.

1.4.2 Caudal. “La medición de caudal (aforo) se realiza con el fin de obtener parejas nivel – caudal que faciliten la calibración de la sección de aforos, la cual se plasma en la curva de gastos o de calibración. Esta curva transformada en una expresión matemática (ecuación) o en una tabla obtenida por lectura de puntos sobre la curva y posterior interpolación, permite la conversión de niveles horarios en caudales horarios”<sup>26</sup>.

- **Requerimientos técnicos de la sección de aforo.** Los siguientes son los requerimientos técnicos y logísticos para la selección de las secciones transversales de aforo.
  - a. La sección debe estar situada a un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección.

---

<sup>25</sup> Ibíd., p. 28.

<sup>26</sup> Ibíd., p. 36.

b. La corriente debe mostrar líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente e igualmente que sean normales a la sección transversal de aforos, de tal manera que la medición de la velocidad sea precisa para la obtención del caudal.

Cualquier desviación en las líneas de flujo produce alteración en la magnitud, por cuanto vectorialmente no corresponde al 100% de la velocidad, sino a una componente de la misma.

c. La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamiento en aguas máximas, con lo cual se garantiza la calibración de caudales máximos.

d. La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme, evitándose tramos con quiebres fuertes de pendiente que desequilibran la velocidad del flujo (Manning), así mismo áreas de aguas muertas y contracorrientes o remolinos.

e. El lecho del río debe tener geometría regular, cauce estable y no tener obstáculos (troncos de árboles, grandes rocas, vegetación, etc.)

f. Se debe evitar los lechos fangosos.

g. La geología del terreno deberá facilitar la construcción de las obras para medición como tarabitas, puentes, pasarelas, etc.<sup>27</sup>.

1.4.2.1 Aforos. Existen varias técnicas para la realización de aforos, las cuales varían principalmente según el caudal del río.

Nota: las siguientes son las recomendaciones para la realización de aforos extraídos del *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua, IDEAM, 2007*.

- Aforo por vadeo. Se utiliza en corrientes pequeñas menores a un metro de profundidad (<1m) y velocidades menores a un metro por segundo (<1m/s). Lo que permite que los equipos y operarios ingresen al cauce de forma segura.

Los requerimientos son: cinta métrica, varillas de vadeo, contador de revoluciones, Molinete o micro molinete, cartera de aforos y planillero, dos técnicos (inspector y aforador).

---

<sup>27</sup> IDEAM, Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. Observación y Medición en Aguas Superficiales de Niveles, Caudales y Sedimentos. Imprenta Nacional de Colombia, 2007. 162p.



- Aforo por suspensión. Es necesario cuando los operadores no pueden ingresar al cauce del río de forma segura. En estos casos las mediciones se realizan desde un puente o una tarabita, en donde van suspendidos los equipos desde un malacate a través de un cable, que también sirve para medir la profundidad en las diferentes abscisas.

Los requerimientos son: Malacate y tabla con polea, Molinete completo incluido cola estabilizadora, contador de revoluciones, cartera de foros y planillero, escandallos (pesas) de 30, 60, 75 y 100 kilos, a utilizar según el empuje del flujo, transportador para medición del ángulo de arrastre, y dos técnicos (Inspector y aforador).

- Aforo angular. Se aplica a grandes ríos, cuando no es posible definir el abscisado por medio de mediciones directas con cinta. En este tipo de aforos se hace necesario el apoyo topográfico para la ubicación a través de la sección del río, y la posición de la lancha en el momento del aforo.

Los requerimientos son: definir la sección con mojones en las dos márgenes, jalones y banderolas de colores vivos, sextante o tránsito, lancha con motor fuera de borda, malacate y tabla con polea, molinete completo incluido cola estabilizadora, contador de revoluciones, cartera de aforos y planillero, escandallos (pesas), radios portátiles o celulares.

Personal requerido: inspector de aforos, aforador, motorista y auxiliar de topografía.

## 1.5 DENSIDAD DE ESTACIONES.

Para garantizar un adecuado monitoreo meteorológico es necesario considerar un mínimo de estaciones por unidad de área, la OMM en la Guía de Practicas Hidrológicas<sup>28</sup> recomienda una estación por cada 10 km<sup>2</sup> a 20 km<sup>2</sup>.

Estos valores que recomienda la OMM son muy ambiguos haciendo que esta decisión quede en manos de los diseñadores, pero principalmente limitada por los recursos económicos disponibles. El gobierno de la India junto con el de Holanda para el año 2001 publicaron un manual de diseño para el monitoreo meteorológico<sup>29</sup>, donde establecen densidad de estaciones por unidad de área teniendo en cuenta la configuración fisiográfica como se muestra en la tabla 7. En

<sup>28</sup> WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information, WMO-No. 168, Sixth edition, 2008.

<sup>29</sup> GOVERNMENT OF INDIA AND GOVERNMENT OF THE NETHERLANDS. Design Manual-Hydro-Meteorology. Volume III, 2008.

la tabla 8 se muestran ejemplos de regiones de la India instrumentadas y la cantidad de estaciones por unidad de área.

Muller *et al* (2013) hace una revisión y comparación de las redes de monitoreo en diferentes ciudades del mundo, encuentra que la densidad de las estaciones por unidad de área está relacionada con el objetivo de la red, además de la escala del estudio en el cual se utilizarán dichas estaciones<sup>30</sup>. En la tabla 9 se pueden observar algunos de los datos encontrados por los autores.

Tabla 7. Densidad de estaciones según configuración fisiográfica

Región	Densidad mínima km <sup>2</sup> /estación	
	Sin almacenamiento	Con almacenamiento
Montañosa	250	2.500
Semi montañosa	500	5.000
Llanura, alta precipitación	500	5.000
Llanura, baja precipitación	900	9.000
Región Árida	10.000	100.000

Fuente: Elaboración propia, tomado de Design Manual – Hydro – Meteorology.

Tabla 8. Densidad estaciones India

Estado	Área	Mínimo número de estaciones		
		Llanura	Montañoso	Total
Andhra Pradesh	275.100	230	140	370
Gujarat	195.900	163	100	263
Karnataka	192.000	288	182	470
Kerala	38.000	52	52	104

Fuente: Elaboración propia, tomado de Design Manual – Hydro – Meteorology.

Tabla 9. Densidad de estaciones según la escala del estudio

Escala	Ciudad	Área monitoreo	Numero estaciones
Meso escala	Helsinki, Finlandia	150 km <sup>2</sup>	102
	Oklahoma, USA	181.000 km <sup>2</sup>	120
Escala de ciudad	Tokyo, Japón	2187 km <sup>2</sup>	120
	Tai Pei, Taiwán	271.79 km <sup>2</sup>	60

<sup>30</sup> MULLER, Catherine L; CHAPMAN, Lee; GRIMMOND, C.S.B; YOUNG, Duick T; CAI, Xiamonig. Sensors and the city: a review or urban meteorological networks. En: International Journal of Climatology. June, 2013. Volume 33, Issue 7, p. 1585-1600.

Tabla 9. (Continuación)

Escala	Ciudad	Área monitoreo	Numero estaciones
Micro Escala	Lausanne (EPFL) University Campus, Suiza	750 m x 500 m	92
	Universidad de Princeton, USA	300 m x 300 m	7

Fuente: Elaboración propia.

## 1.6 SISTEMAS INTEGRADOS DE DRENAJE URBANO

En la actualidad colombiana los sistemas de drenaje urbano están enfocados en la prevención de inundaciones y la prevención en la salud pública, por lo tanto, el principal objetivo de estos sistemas de drenaje es evacuar el agua lo más rápido posible haciendo de esto un modelo poco práctico y costoso ya que no tiene en cuenta todos los componentes del sistema como lo son la captación, potabilización, conducción, distribución, evacuación, tratamiento y descarga<sup>31</sup>.

Para el caso específico de los sistemas de drenaje habitualmente se encuentran sistemas combinados e independientes, en el primero las aguas residuales resultantes de los diferentes usos dados en el sitio junto con el agua proveniente de la escorrentía son captadas y transportadas por un mismo conducto hacia la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), en los sistemas independientes tanto el agua residual como el agua de escorrentía son captados y transportados por conductos independientes. El agua residual es llevada a la PTAR para su tratamiento y posterior descarga en un cuerpo receptor, pero el agua de escorrentía es llevada directamente a descarga sobre un cuerpo receptor debido a que se tiene la idea de que esta agua está más limpia, pero se debe tener en cuenta el lavado que esta hace de las diferentes superficies impermeables cambiando su calidad la cual puede resultar más toxica que la del agua residual<sup>32</sup>.

Los modelos para simular los sistemas de alcantarillado le han dado más importancia al proceso físico del flujo del agua en los conductos que la transportan hacia la PTAR, en cuanto al modelado de esta última se le da más relevancia a los procesos químico - biológicos presentes en estas dejando de lado el flujo del agua por cada uno de sus componentes. El cuerpo receptor no se tiene en cuenta y este es uno de los que más presenta impacto ya que los tratamientos no eliminan en su totalidad los contaminantes dando como resultado degradación de estos

<sup>31</sup> GONZÁLEZ PARRA, Juan Diego. Modelación integrada del sistema de drenaje – PTAR – río de la ciudad de Bogotá. escenarios de control regional. Tesis de Maestría. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2011. 9-11p.

<sup>32</sup> Schütze, M., D. Butler, and B. Beck. . Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems. Londres. Springer-Verlag. 2002.

cuerpos de agua y afectando el equilibrio biológico con impactos como son la eutrofización y aumento de los niveles de amonio.

Las miradas actuales de los sistemas integrados de drenaje urbano conciben a los conductos de transporte (alcantarillado) como sitios donde ocurren reacciones físicas, químicas y biológicas los cuales pueden ser degradación de materia orgánica, consumo de oxígeno, etc. Aquí se debe tener en cuenta las interacciones de las diferentes fases del drenaje urbano. El lavado de superficies impermeables trae consigo el transporte de diferentes tamaños de partículas llevando a la sedimentación y acumulación de estas afectando el flujo en el conducto. Las PTAR habitualmente son estructuradas de la siguiente manera: pretratamiento donde se hacen procesos de cribado y desarenado entre otras, luego viene el tratamiento primario el cual consiste generalmente en tamizado y sedimentación, tratamiento secundario en este se hace desinfección por medio de agentes químicos, físicos, mecánicos, etc y sistemas de lagunaje, la eliminación de nutrientes se realiza bajando la concentración de nitrato y fosforo por ultimo viene los tratamientos avanzados donde se utiliza la coagulación química, floculación, filtros de carbono entre otros. Como se mencionó anteriormente los procesos que se tiene en cuenta al modelar una PTAR son los procesos químico – biológicos, en la actualidad existen modelos de PTAR que pueden simular degradación de materia orgánica, remoción de nitrógeno, nitrificación de amonio, generación de lodos teniendo en cuenta aspectos hidráulicos involucrados en estos procesos<sup>33</sup>.

En cuanto al cuerpo receptor el modelo actual solo lo considera como donde depositar el agua y ya, sin tener en cuenta que el agua depositada en estos tiene concentraciones de diferentes compuestos que generan impacto negativo en los cuerpos de agua. Las sustancias pueden provocar desde la muerte de la vida en estos ecosistemas, la eutrofización y cambios en la estética y dinámica fluvial por la presencia de sedimentos. Para la modelación de ríos y cuerpos de agua se han desarrollado modelos que han sido explicados en capítulos anteriores los cuales van desde la utilización de la ecuación de Saint Venant aproximaciones de series o modelos hidrológicos donde se deben tener en cuenta diferentes parámetros y variables sin dejar de lado que los modelos no tienen en cuenta las condiciones reales del río si no suponen una condición ideal. Para el caso de la modelación de la calidad de agua en un cuerpo de agua es necesario tener en cuenta la temperatura del agua, la concentración del contaminante dentro del agua, la degradación de la materia entre otras muchas más variables que hacen compleja la modelación de la calidad de agua en estos cuerpos receptores.

Los enfoques modernos de los sistemas de drenaje urbano enfocan su funcionamiento en disminuir los impactos ambientales generados por la

---

<sup>33</sup> Metcalf & Eddy Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition ed. Hill, Mc Graw. 2003

evacuación de las aguas residuales y de escorrentía, esto se plantea haciendo uso del almacenaje o retención dentro del sistema lo cual traería consigo una menor cantidad de agua para tratar en la PTAR y así una menor descarga de contaminantes en el cuerpo receptor. Según Van Der Steen plantea un modelo holístico que agrupe todos y cada uno de los componentes de un sistema de drenaje urbano en el cual no solo estará las obras de ingeniería (captación, alcantarillados, PTAR, etc.) si no también la opinión de la comunidad, educación ambiental entre otros todo esto con el fin de disminuir tanto el agua de escorrentía a transportar como el agua residual a tratar. Estos sistemas de drenaje urbano sostenible se conocen como SUDS por sus siglas en inglés, aparte de las disminuciones en consumo y transporte también plantean un almacenaje dentro del sistema de drenaje además de acelerar la infiltración todo esto puede ser posible mediante la utilización de techos verdes, pavimentos porosos y la integración de humedales naturales al sistema o haciendo uso de estructuras de retención como lo son los pondajes. Los tratamientos en la PTAR pueden disminuirse haciendo barridos de calles para evitar el transporte de contaminantes, así como campañas para el buen uso del agua, así como su reciclaje.

El modelo de drenaje urbano sostenible busca principalmente la reducción de los impactos ambientales con las medidas mencionadas anteriormente, planteando la unión de cada uno de los componentes del drenaje y que estos no se analicen por separado, si no que los resultados de un componente sean los datos de entrada del siguiente en la secuencia, pero la dificultad de plantearlo de esta forma es que cada componente tiene parámetros de entrada y variables diferentes lo que hace compleja este tipo de modelación. Con el pasar del tiempo el intentar disminuir la contaminación en el cuerpo receptor demostraba ser una manera inviable desde el punto de vista costo-beneficio por lo que se optó por un sistema de monitoreo en tiempo real del sistema de drenaje, lo cual se vería reflejado en una modelación en intervalos de tiempo especificado (grandes precipitaciones) haciendo de esto un control y posterior planeación, gestión en una situación particular y así optimizar su funcionamiento<sup>34</sup>.

La metodología de modelación de estos sistemas de drenaje parte de la articulación de tres factores importantes: objetivos, datos y modelos disponibles. Los objetivos definen el nivel de complejidad del sistema y delimitan el alcance del estudio. La cantidad y calidad de datos está definida por los objetivos del estudio. El tipo de modelo a utilizar viene definido por los datos disponibles lo que haría que se reevaluaran los objetivos del estudio.

---

<sup>34</sup> GONZÁLEZ PARRA, Juan Diego. Modelación integrada del sistema de drenaje – PTAR – río de la ciudad de Bogotá. escenarios de control regional. Tesis de Maestría. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2011. 9-11p

El Grupo Europeo de Investigación y Simulación (HSG) desarrolló una guía para la simulación de sistemas integrados de drenaje urbano, planteado como se muestra en la tabla 10.

“Schütze y Alex (2004), proponen implementar el modelo con una estructura modular, mediante bloques interconectados, denominada modelación integrada basada en modelos simplificados”. Esto se puede llevar a cabo en plataformas como MATLAB o SIMULINK.

Tabla 10. Guía para modelar sistemas de drenaje urbano, según el Grupo Europeo de Investigación y Simulación.

Paso	Descripción
1. Análisis del sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de fallas en el sistema o necesidad de optimizar.</li> </ul>
2. Identificación de procesos y criterios	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación posibles causas de las falencias.</li> <li>Determinar procesos y criterios relacionados con los objetivos del estudio.</li> <li>Identificación de variables y componentes para describir los procesos.</li> </ul>
3. Selección de la aproximación más adecuada, y de los datos necesarios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determina la cantidad y calidad de datos necesarios.</li> <li>Más detallada la aproximación se necesitan más datos.</li> </ul>
4. Análisis de modelo y de los datos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de los datos para encontrar inconsistencias.</li> <li>Identificación de inconsistencias entre los subsistemas.</li> </ul>
5. Calibración y validación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registros simultáneos de diferentes variables en sitios diferentes del sistema.</li> <li>Estimar de manera separada los parámetros de cada subsistema para después integrarlo</li> <li>Comparación de los diferentes escenarios obtenidos con el estado inicial del sistema.</li> </ul>
6. Análisis de escenarios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los diferentes escenarios deben ser comparados con un estado de referencia</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos disponibles actualmente son de dos tipos: físicamente basados y conceptuales los cuales se comparan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Comparación modelo físico vs conceptual.

Modelo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Físicamente basado	Involucra parámetros que tengan un significado físico.	Resultados muy acertados	Complejidad e interacción paramétrica que involucra.
Conceptual	Usan algoritmos simplificados y no necesariamente tienen significado físico	Menor incertidumbre. Más sencillo de ejecutar Requiere menos datos	Menos preciso. Resultados menos acertados que un modelo físico. Menos flexible para la calibración

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla que se muestra a continuación se muestra una comparación de los diferentes modelos de drenaje urbano sostenible desarrollado por diferentes agencias públicas y privadas.

Tabla 12. Comparación de modelos para simulación de los sistemas de drenaje urbano.

Nombre	Desarrollador	Ventajas	Desventajas
ICS ( <i>Integrated Catchment Simulator</i> )	Danish Hydraulic Institute y el Water Research Centre	Modela sistemas integrados de drenaje aguas arriba y abajo. Modela alcantarillados, ríos y PTARs	Complejidad en los sub-modelos que involucra.
HYDROWORKS	Wallingford Software y Anjou Reserche.	Modela integradamente ríos y alcantarillados	No incluye PTARs
SYNOPSIS ( <i>Software Package for Synchronous Optimization and Simulation of the Urban Wastewater System</i> )		Simula y optimiza. Modela ríos alcantarillados y PTARs	Su complejidad lo limita
WEST ( <i>World Engine for Simulation and Training</i> )	Universidad de Gent (Bélgica)	Modela sistemas dinámicos interconectados. Simula alcantarillados, PTARs y ríos.	Poca flexibilidad por que simula a largo plazo.

Tabla 12. (Continuación)

Nombre	Desarrollador	Ventajas	Desventajas
CITY DRAIN	Universidad de Innsbruck (Austria)	Ambiente Matlab y Simulink. Modela los diferentes procesos de los subsistemas. Bastante flexible.	Limitantes en la modelación de la calidad del agua en ríos, alcantarillados y PTARs
SIMBA	IFAK (Institut für Automation und Kommunikation), en Alemania.	Ambiente Matlab y Simulink. Modela cantidad y calidad de agua en alcantarillados, PTARs y ríos. Permite gran cantidad de bloques en los subsistemas así como modificarlos.	

Fuente: Elaboración propia.

## 1.7 TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

El mercado actualmente ofrece una gran cantidad de aparatos o instrumentos para medir las variables hidrometeorológicas, el abanico de posibilidades va desde aparatos sencillos que se pueden instalar en la pared de la casa el cual nos mostraría temperatura, humedad, presión atmosférica y un pronóstico del clima, existen algunos que miden la velocidad del viento y vienen con un anemómetro incluido. Estos aparatos pueden considerarse de uso doméstico ya que su precisión no es la mejor, el uso de los datos tomados con estos para estudios hidrológicos y pronóstico de clima no es recomendable.

Imagen 1. Estaciones meteorológicas caseras. TFA 35.1089IT y La Crosse WS9250.



Fuente: [www.pce-instruments.com](http://www.pce-instruments.com)



Imagen 2. Estaciones meteorológicas caseras con anemómetro. TFA 35.1140 y La Crosse WS6868



Fuente: <https://www.casaclima.com>

Por otra parte, también se pueden encontrar equipos para medir cada una de las variables hidrometeorológicas los cuales se pueden considerar de uso profesional, ya sea para pronóstico meteorológico o para prevención de desastres. Estos aparatos deben cumplir con normas de orden internacional (OMM) o de orden nacional (IDEAM) para garantizar una homogeneidad en la toma de datos y que estos puedan utilizarse en estudios que involucren más de un país.

Dentro de esta variedad de equipos profesionales, es posible encontrar equipos de mano o portátiles, así como los equipos para emplazar o fijos, dentro de estos últimos están los que miden cada variable por separado y las estaciones automáticas las cuales miden más de una variable. Todos estos equipos cuentan con una memoria interna y software para la gestión de los datos que registran, además también se ofrecen productos que permiten la comunicación de varias estaciones emplazadas en una zona de interés ayudando a la administración y procesamiento de datos para así emitir alertas o sugerencias para el caso de equipos meteorológicos utilizados en la agronomía.

1.7.1 Aparatos de mano o portátiles. Los aparatos de medición de mano son simples, sencillos y pequeños miden temperatura, humedad, velocidad del viento, punto de rocío, temperatura del bulbo húmedo, en el mejor de los casos ya que por lo general estos aparatos miden dos variables que en su mayoría son temperatura y humedad. El rango de estos aparatos esta entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $+70^{\circ}\text{C}$ , se puede utilizar en interiores y exteriores, pero por lo general su uso es de tipo industrial.

Imagen 3. Medidores climatológicos portátiles. PCE-THA 10



Fuente: [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-climatologico-kat\\_70043\\_1.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-climatologico-kat_70043_1.htm)

Para el caso de la hidrometeorológica existen aparatos de medición más sofisticados con más precisión, más variables que pueden medir y que también son portátiles como se muestra a continuación.

Se consideran como módulos de adquisición de variables meteorológicas capaces de registrar, almacenar y visualizar en tiempo real, miden variables como temperatura, humedad, presión atmosférica, pluviosidad, velocidad y dirección del viento, radiación solar. Son estaciones que se pueden instalar en aproximadamente 10 minutos, la precisión es buena, si se quiere transmisión de datos es necesario contratarlo por separado.

En algunos casos cuenta con paneles solares para no tener dependencia de una batería o fuente de alimentación y así evitar las limitaciones de tiempo. También se pueden encontrar estaciones climatológicas acopladas a automóviles que tienen las mismas características de las mencionadas anteriormente.

Imagen 4. Estaciones climatológicas portátiles.



Fuente: [http://www.sensorital.com/productos.aspx?men\\_id=3&h=3.3](http://www.sensorital.com/productos.aspx?men_id=3&h=3.3)

Imagen 5. Medidor climatológico PCE-FWS 20.



Fuente: [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-climatologico-pce-instruments-medidor-climatologico-pce-fws-20-det\\_101080.htm?\\_list=k&\\_listpos=9](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-climatologico-pce-instruments-medidor-climatologico-pce-fws-20-det_101080.htm?_list=k&_listpos=9)

1.7.2 Aparatos para medir cada variable. Si solo se desea saber el valor de una variable meteorológica o de un parámetro hidrológico el mercado también ofrece posibilidades para esto, como se mostrará a continuación.

1.7.2.1 Precipitación. El avance de la tecnología cambio la forma de registro de los datos de precipitación, en un principio se presentaba de forma gráfica dando el nombre a este aparato “pluviógrafo”. Con el desarrollo de la tecnología la toma de datos se hacen por medio de aparatos electrónicos y datalogger para el procesamiento almacenaje y transmisión de los datos. Por lo tanto, los pluviógrafos pasaron a ser pluviómetros.

Las siguientes tablas muestran algunos de los que se ofrecen en el mercado actualmente.

Tabla 13. Ejemplos pluviómetros comerciales.



	
Modelo: DataRain-4000	Modelo: MetPark RG
Aparato: pluviómetro electrónico de pesada	Aparato: pluviométrica/meteorológica Estación
Fabricante: GEONICA.	Fabricante: SENSOVAT

Tabla 13 (Continuación)

Precisión: 1% en todo el rango	Precisión: 0.1mm
--------------------------------	------------------


Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Ejemplo sensores de precipitación comerciales.

	
Modelo: TS 221	Modelo: 15188
Aparato: Sensor de precipitación	Aparato: pluviómetro de bajo costo
Fabricante: TECMES	Fabricante: LAMBRECHT
Precisión: 0.25 mm	Precisión: 0.2 mm



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Ejemplo pluviómetro y sensor de precipitación comerciales.

	
Modelo: WTB100	Modelo: pluviómetro óptico o disdrómetro.
Aparato: Sensor de precipitación	Aparato: pluviómetro
Fabricante: DILUS	Fabricante: SENSORVITAL
Precisión: $\pm 2\%$ (S. captación 200cm <sup>2</sup> )	Precisión: 0.2 mm

Fuente: Elaboración propia


Tabla 16. Ejemplo pluviómetros comerciales.

	
Modelo: S-RGF-M002	Modelo: Clima sensor US
Aparato: pluviómetro	Aparato: pluviómetro
Fabricante: ONSET.	Fabricante: THIES clima.
Precisión: 0.2 mm	Precisión: 2%

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.7.2.2 Viento.

Tabla 17. Ejemplo sensores de viento comerciales.

	
Modelo: LUFFT VENTUS	Modelo: Wind sensor compact
Aparato: Anemómetro electrónico.	Aparato: anemómetro mecánico
Fabricante: LUFFT	Fabricante: DILUS.
Precisión: 0.5 m/s	Precisión: 0.5 m/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Ejemplo anemómetros comerciales.



	
Modelo: Vantage Pro 2 y Pro 1	Modelo: CSAT3A

Tabla 18. (Continuación)

Aparato: Anemómetro mecánico	Aparato: anemómetro sónico
Fabricante: KOSMOS	Fabricante: Campbell
Precisión: 0.5 m/s	Precisión: 0.1 m/s



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Ejemplo anemómetros comerciales.

	
Modelo: Wind transmitter classic	Modelo: Serie Ws
Aparato: Anemómetro mecánico	Aparato: anemómetro ultrasónico
Fabricante: THIES clima	Fabricante: OTT
Precisión: 0.5 m/s	Precisión: 0.1 m/s



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Ejemplo anemómetros comerciales.

	
Modelo: Wind master	Modelo: AO-JDC
Aparato: Anemómetro sónico 3d	Aparato: anemómetro de turbina
Fabricante: Sensovat	Fabricante: Davis
Precisión: 0.5 m/s	Precisión: 0.5 m/s



Fuente: Elaboración propia.

1.7.2.3 Temperatura y humedad del aire.  
 Tabla 21. Ejemplo termómetros comerciales.

	
Modelo: Hygro-Thermo Transmitter compact	Modelo: TR20
Aparato: Termómetro eléctrico	Aparato: sensor de T y humedad del aire
Fabricante: Thies clima	Fabricante: IGS
Precisión: 0.1°C	Precisión: 0.1 °C

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Ejemplo sensores de temperatura.

	
Modelo: TS251T	Modelo: EE160
Aparato: sensor de temperatura y humedad del aire	Aparato: sensor de temperatura y humedad del aire.
Fabricante: Tecmes	Fabricante: sensovat
Precisión: 0.1°C	Precisión: 0.1 °C

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Ejemplo sensores de temperatura comerciales.





	
Modelo: HMP60	Modelo: STH-S331

Tabla 23. (Continuación)

Aparato: sensor de temperatura y humedad del aire	Aparato: sensor de temperatura y humedad relativa del aire, sumergible
Fabricante: Campbell scientific	Fabricante: Geonica
Precisión: 0.1°C	Precisión: 0.1 °C

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 24. Ejemplo de sensores de temperatura comerciales.

	
Modelo: Air temperature transmitter	Modelo: S-TMB-M002
Aparato: sensor de temperatura y humedad del aire	Aparato: sensor de temperatura y humedad del aire.
Fabricante: Dilus	Fabricante: Onset
Precisión: 0.1°C	Precisión: 0.1 °C

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.7.2.4 Radiación solar.



Tabla 25. Ejemplo piranómetros comerciales.

	
Modelo: CMP 311	Modelo: MS 602
Aparato: piranómetros	Aparato: Piranómetros segunda clase
Fabricante: Thies clima	Fabricante: Eko
Precisión: 0.2%	Precisión: 1.7 %

Fuente: Elaboración propia.





Tabla 26. Ejemplo sensores de radiación solar comerciales.

	
Modelo: TS 304	Modelo: SV-SR05
Aparato: Sensor de radiación solar	Aparato: Piranómetro digital segunda clase
Fabricante: Tecmes	Fabricante: Sensovot.
Precisión: 3%	Precisión: 1.0 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Ejemplo piranómetros digitales comerciales.

	
Modelo: GEO-PSP	Modelo: CMP3
Aparato: Piranómetro espectral.	Aparato: Piranómetro digital
Fabricante: Geonica	Fabricante: Campbell Scientific
Precisión: 3%	Precisión: 1.0 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Ejemplo sensores de radiación comerciales.



	
Modelo: DA06450	Modelo: Sunshine MS-093



Tabla 27. (Continuacion)

Aparato: sensor de radiación solar.	Aparato: Piranómetro digital
Fabricante: Kosmos	Fabricante: IGS
Precisión: 1%	Precisión: 1 %

Fuente: Elaboración propia.



#### 1.7.2.5 Presión atmosférica.

Tabla 29. Ejemplo barómetros comerciales.

	
Modelo: MSB 181	Modelo: S-BPB-CM50
Aparato: Barómetro digital	Aparato: sensor inteligente de presión barométrica.
Fabricante: DILUS	Fabricante: Onset
Precisión: 1%	Precisión: 1 %

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 30. Ejemplo sensores de presión barométrica.

	
Modelo: 092 L	Modelo: GEO-61302
Aparato: sensor de presión barométrica	Aparato: sensor de presión barométrica
Fabricante: Campbell Scientific	Fabricante: Geonica
Precisión: 1%	Precisión: 1 %

Fuente: Elaboración propia.

### 1.7.2.6 Nivel de agua.

Tabla 31. Ejemplo sensores de nivel de agua.

	
Modelo: RL-15	Modelo: CS477
Aparato: Sensor de nivel de agua	Aparato: Sensor de nivel de agua
Fabricante: DILUS	Fabricante: Campbell Scientific
Precisión: 2mm	Precisión: 1 mm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Ejemplo sensores de nivel de agua.

	
Modelo: radar 6115	Modelo: TS310F
Aparato: Radar para el nivel del agua superficial	Aparato: Sensor de nivel por flotación
Fabricante: Geonica	Fabricante: Tecmes
Precisión: 2mm	Precisión: 1 mm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Ejemplo de sensores hidrométricos.



	
Modelo: LU 06 A	Modelo: RLS

Tabla 32. (Continuación)

Aparato: sensor hidrométrico por ultrasonido	Aparato: Sensor de nivel por radar e impulsos
Fabricante: Nesa SRL	Fabricante: OTT
Precisión: 2mm	Precisión: 1 mm

Fuente: Elaboración propia.

## 1.8 SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA.

Según las directrices sobre Sistemas de Alerta Temprana y Aplicación de Predicción Inmediata y Operaciones de Aviso de la OMM (2010), la aplicación de los sistemas de alerta temprana se basa en la mitigación y minimización de riesgos geo ambientales fundamentado en una caracterización de la zona a estudiar para identificar los posibles riesgos a que se encuentra expuesto este sitio.

Para llevar a cabo la identificación de posibles riesgos se hace necesario la utilización de datos ya sean geográficos, demográficos, económicos meteorológicos, etc., los cuales procesados pueden generar mapas con riesgos según su intensidad de afectación dando así la mejor forma de abordarlo en caso de presentarse.

La preparación y predicción de situaciones futuras se hace con datos recolectados los cuales en su mayoría son datos hidrometeorológicos (niveles, precipitación, temperatura, etc.) la procedencia de estos datos puede ser radares meteorológicos, imágenes satelitales climatológicas o de estaciones meteorológicas emplazadas en sitios determinados. Estos datos deben ser organizados de tal forma que pueda generarse una cooperación y comunicación entre las diferentes entidades encargadas de la atención, gestión, predicción de riesgos ya sean de carácter gubernamental, privado, académico, etc.

Después de obtener todos estos datos y hacer sus respectivos tratamientos se generan predicciones de clima las cuales podrían ser situaciones adversas para la cuales ya se tendría planteado una línea de acción dependiendo la intensidad, dirección, velocidad, magnitud con que esta ocurra. Los eventos que se puede predecir su ocurrencia van desde grandes precipitaciones, inundaciones, deslizamientos, aumento o disminución de la temperatura, tormentas costeras, incendios forestales, etc. Las líneas de acción para la gestión de riesgos abarcan desde alertas para que la gente se quede en casa, busque refugio, no utilice infraestructura vulnerable, utilice medios de transporte, prepare para temperaturas extremas en especial las personas adultas y animales, ejemplos de este tipo de acciones son China debido a la gran influencia de tormentas convectivas, Francia genero sistemas de alerta temprana después de oleadas de calor en el 2001 y tormentas costeras en el Mediterráneo en el 2009. Como un último paso en la gestión del riesgo se plantea el blindaje económico frente a las catástrofes el cual

consiste en asegurar lo bienes que tiene más probabilidad de daño durante una emergencia<sup>35</sup>.

El fácil acceso a esta información genera que los habitantes de estas zonas pueden tener sus propias medidas de mitigación de riesgo ya que esta información debe ser de acceso público por medio de plataformas digitales en internet las cuales mostrarían información en tiempo real y predicciones entre 30 minutos y 3 horas según sea el lugar o el tipo de evento que esté ocurriendo. La educación y concienciación de las comunidades vulnerables también es un factor importante ya que si no se tiene claro cómo enfrentar una situación de emergencia que ocurra durante o después disminuiría los impactos negativos que estas tienen.

Para el caso de Colombia el abordaje de la gestión del riesgo y sistemas de alerta temprana se basa en los lineamientos planteados por la OMM en el 2006 y 2010, los cuales se trataron anteriormente pero resalta las características particulares de la geografía colombiana, la cual haría difícil las labores de monitoreo de todas las cuencas por eso plantea los sistemas de alerta temprana donde se parte de una educación a la comunidad partiendo de la identificación del riesgo de la zona en particular, la conformación de comités de comunicación, la capacitación de estos comités y por último la instalación de aparatos de medida que pueden indicar el riesgo potencial. La comunicación entre los habitantes de una zona con riesgo es el principal elemento para los sistemas de alerta temprana comunitaria, los habitantes de las zonas altas al ser estas los sitios en los que más llueve deben estar en constante comunicación y aviso con los habitantes de las zonas bajas, porque esta parte es la que tiene más riesgo de inundarse. La instalación de miras limnimétricas en puentes, estructuras hidráulicas, rocas o árboles da una idea de la cantidad de agua que puede llevar el río y así dar un aviso oportuno al resto de población por medio de alarmas comunitarias accionadas por el comité de riesgos. En algunas partes del país ya existen sistemas de alerta temprana automatizados los cuales activan estas alarmas de forma automático o arrojan alertas para estar pendientes en caso de que algún evento ocurra<sup>36</sup>.

Para el caso de las zonas urbanas en Colombia los riesgos geo ambientales más comunes son las inundaciones y los deslizamientos, los primeros a causa de grandes precipitaciones por un tiempo prolongado además de construcciones hechas en lugar de alto riesgo de inundación. La ocurrencia de deslizamientos va ligada a la construcción en zonas inestables y a grandes precipitaciones las cuales aceleran estos procesos ya que ocasionaría que los suelos alcancen sus límites y ocurran estos desastres. La gestión del riesgo para estos dos eventos parte de

---

<sup>35</sup> DOMINGUEZCALLE, Efraín y LOZANO BAEZ, Sergio. Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. En: Rev. Acad. Colomb. Cienc. Julio-Septiembre, 2014. N°38, p321-332.

<sup>36</sup> GONZALEZ VELANDIA, Julio Cesar. La gestión del riesgo en desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos. Bogotá. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. 2014. 73 p.

una caracterización del sitio en cuestión para saber con qué se enfrenta y como abordar esto. Pero un factor importante para que esto funcione es tener a la mano una buena cantidad de registros hidrometeorológicos los cuales se utilizan para modelar y obtener los valores máximos de los ríos, quebradas, canales, alcantarillado antes de que ocurra un desastre, para luego poner en acción los planes de evacuación y demás. En los deslizamientos estos datos también son de gran importancia ya que con la caracterización de los suelos en las zonas vulnerables de deslizamiento se sabrá con que cantidad de aguas estas pueden fallar y así emitir alertas de prevención<sup>37</sup>.

## 1.9 GEOESTADÍSTICA Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.

A pesar de que la geoestadística fue desarrollada con fines de aplicación en la minería, esta ha tenido gran impacto en áreas como la agronomía, biología, geología, ingeniería, etc. Para el caso de la última y más específicamente la modelación de procesos meteorológicos, debido a que las variables involucradas en estos tienden a cambiar en el tiempo y en el espacio.

Más específicamente en este trabajo de investigación la incertidumbre en la modelación de fenómenos hidrometeorológicos está ligada a factores como la orografía, la cobertura y uso de suelo entre otros, lo cual crea diferentes climas en áreas pequeñas como es el caso de las ciudades donde se encuentran construcciones de diferentes niveles con distintos tipos de cubiertas hechas con materiales que absorben calor creando un fenómeno denominado microclima, produciendo deficiencias en la toma de datos desencadenando una serie de errores que pueden llevar a la falla en la infraestructura encargada del control y manejo del recurso hídrico, además de deficiencias en la planeación y gestión de estos recursos. Para disminuir el impacto de esa incertidumbre se han venido desarrollando métodos de interpolación usando herramientas computacionales, los cuales consisten en procesar datos que son registrados puntualmente (precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento, etc.) a determinadas distancias, pueden ser determinísticos (IWD) o probabilísticos (Kriging y sus variaciones) dando como resultado mapas de isolíneas donde se representa franjas de terreno con un rango de valor de la variable que se ha analizado. El método más utilizado es el Kriging con cada una de sus variaciones el cual se basa en la varianza de la estimación para detectar un error sistemático sin depender de los datos reales, “permite estimar valores puntuales o funciones lineales del campo aleatorio en una región usando un conjunto limitado de valores puntuales, además de dar una medida de precisión de los datos estimados”<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> UNGRD, Guía para la Implementación de Sistemas de alerta temprana. Sistemas de monitoreo y alerta temprana. Bogotá, 2016. 31p.

<sup>38</sup> GIRALDO HENAO. Ramon. Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación: Predicción espacial. Primera edición. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 94p.

La interpolación por medio de Kriging parte de un análisis estructural de los datos a modelar, donde se identifica la componente estructural del modelo por lo general es la media de los datos, después de esto se hace el semivariograma el cual depende la distancia entre los puntos muestreados, de la diferencia de estos valores en diferentes direcciones y del número total de datos, se evalúa en diferentes direcciones para verificar la existencia de isotropía o anisotropía entre los datos y a diferentes distancias para determinar la semivarianza experimental. Una vez obtenido estos valores con diferentes distancias y direcciones se construyen el semivariograma el cual es una gráfica donde sobre el eje x va la distancia y en el eje y la semivarianza, esta se irá aumentando a medida que la distancia también lo hace hasta llegar a un punto que se mantenga constante. “Generalmente el semivariograma se ajusta a una función, y los tipos de curva más comunes son el lineal, el esférico, el exponencial y el gaussiano”<sup>39</sup>

Los resultados de estos procedimientos de interpolación también son sujetos a pruebas de confianza y error corroborando con datos reales para saber cuál se ajusta mejor al comportamiento de una variable específica en un espacio y tiempo definido. Pero cuando la distancia entre las mediciones es considerable surgen errores los cuales se pueden resolver con la instalación de más puntos de medición.

*“En el Kriging simple se considera conocida la componente estructural y normalmente se toma el valor de cero. En el Kriging ordinario se considera desconocida y se establece una condición adicional al sistema de ecuaciones para filtrar el valor desconocido de la media. En el Kriging con factor externo se establece una función externa que define esta componente estructural. En el Kriging universal se considera que esta componente es una función lineal de las coordenadas. En el Kriging con regresión, la componente estructural se ajusta mediante una regresión con una o más variables adicionales. Estas últimas tres técnicas son matemáticamente similares y el nombre cambia por el tipo de variables auxiliares utilizadas, siendo el último el nombre general. También existe el método Cokriging, en el que se utiliza, además de la variable principal, una variable auxiliar de la que se tiene más densidad de observaciones y una fuerte correlación con la primera.”*<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup> VARGAS, Andrés. SANTOS, Ana. CARDENAS, Eder. OBREGON, Nelson. Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. En: Revista DYNA, 2011. Vol. 78. N° 167.

<sup>40</sup> APARICIO MIJARES, Francisco Javier et al. Caracterización espacial de redes pluviográficas: caso de la cuenca Peñitas. En: Tecnologías y Ciencias del Agua. Enero-Marzo, 2012. Vol. III. N° 1. p103-121.

La falta de puntos de medición y saber dónde podrían ir ubicados para desarrollar estos procedimientos también se puede solucionar con las herramientas que ofrece la geoestadística junto con las herramientas informáticas. Los nuevos sitios de medición de variables deben cumplir con normas y estándares tanto nacionales como internacionales para que sus medidas sean precisas y no se vean afectadas por factores externos además de garantizar la homogeneidad de los datos para el caso de los estudios regionales. Al aplicar todas estas condiciones específicas que nos dan las diferentes instituciones y procesarlas en un software de información geográfica junto con la información cartográfica y geográfica necesaria es posible dar la ubicación tentativa de estos puntos.

La modelación espacial es utilizada para la ubicación de sitios con particulares restricciones o especificaciones como es el caso de un relleno sanitario o una PTAR ya que los olores son incómodos para la población que está a su alrededor y deben estar alejados de fuentes hídricas, entre otras especificaciones. Esto también aplica para la ubicación de las estaciones hidrometeorológicas debido a que se deben cumplir directrices de entidades nacionales e internacionales (OMM, IDEAM).

En la ciudad de Medellín en el 2002 en el marco del proyecto “Diseño y calibración de una red de estaciones meteorológicas para la evaluación del riesgo hidrológico en la micro cuenca de la quebrada La Presidenta” (Valdés et al) se determinaron posibles sitios de medición mediante una modelación espacial en la cual aplicaba jerarquías analíticas, partiendo de la identificación de variables (construcciones, pendiente, cobertura vegetal, uso del suelo, etc.) a las cuales se les podía dar un puntaje para indicar el grado de importancia, esto se muestra en un mapa de valores numéricos ilustrando las posibles zonas después de estos se les asignó un valor ponderado aplicando jerarquías y prioridades como proceso analítico donde confluyen el valor cuantitativo y cualitativo disminuyendo la subjetividad, agrupándose en diferentes opciones las cuales son modeladas por el model builder de ArcGIS dando como resultado varios mapas con muchas posibilidades de ubicación.<sup>41</sup>

El uso del Kriging para el diseño y optimización de redes de monitoreo meteorológico es de uso frecuente, en México en el año 2012 se hizo la caracterización espacial de redes pluviográficas en la cuenca del río Peñitas al sur del país donde se utilizó el Kriging para evaluar la eficiencia de una red ya establecida y tener de manera tentativa la ubicación de nuevos puntos partiendo del análisis del error medio de la varianza, para este caso se tuvo en cuenta la elevación de cada una de las estaciones así como sus coordenadas geográficas y el valor de precipitación, hicieron uso del Kriging con regresión por que fue el que

---

<sup>41</sup> VALDES QUINTERO, Juan Carlos. PARRA TORO, Juan Camilo. HERRERA CADAVID, Sebastián. Modelación espacial para la ubicación de estaciones meteorológicas en cuencas hidrográficas. En: Revista Politécnica. Julio-Diciembre, 2013. Volumen 9, Año 9, N° 17. p9-18.



presento mejor ajuste además de tener en cuenta la elevación de la estación debido a que la topografía de esta zona de México es bastante quebrada y está bajo la influencia de fenómenos climatológicos de macro escala<sup>42</sup>.

En el sistema conformado por los ríos Yacambu-Quibor en Venezuela se diseñó una red de monitoreo meteorológico haciendo uso del método del punto ficticio, el cual consiste en ubicar un punto nuevo dentro de una red de monitoreo existente para así disminuir la incertidumbre de la estimación y minimizar la varianza de estos datos, el diseño de la red partía del objetivo de la red y del uso de los datos en este caso serían utilizados para la planeación del recurso hídrico en esta zona del país. Estos puntos ficticios fueron trasladados por diferentes partes del sitio de estudio hasta encontrar una disminución del 50% en la incertidumbre de estimación, lo que plasmaron en varios mapas para hacer la comparación.<sup>43</sup>

---

<sup>42</sup> APARICIO MIJARES, Francisco Javier et al. Caracterización espacial de redes pluviográficas: caso de la cuenca Peñitas. En: Tecnologías y Ciencias del Agua. Enero-Marzo, 2012. Vol. III. N° 1. p103-121.

<sup>43</sup> ROJAS POLACO, María Isabel y MORA MORA, Luis Eduardo. Diseño óptimo de redes pluviométricas. En: Revista Forestal Venezolana. Enero-Junio, 2009. Vol. 53. p9-22

## 2. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología empleada en la realización del presente trabajo de investigación, partiendo de la definición de la zona de estudio, la recopilación de información secundaria (mapas, cartografía, manuales, tesis, artículos, portales virtuales, etc.), la abstracción de la información útil, así como el empleo de técnicas y herramientas hidrológicas y geoestadísticas para la obtención de los resultados.

### 2.1 DESARROLLO METODOLÓGICO

La metodología para determinar la alternativa de instrumentación hidrometeorológica para las cuencas de estudio, parte principalmente del conocimiento de las mismas en cuanto a su comportamiento hidrológico y geomorfológico. Por esta razón es necesaria la recopilación de información secundaria como: cartografía, modelos de elevación digital, fotografías aéreas y mapas temáticos de diferentes entidades públicas o privadas (Alcaldía de Tunja, Corpoboyacá, IGAC, Proactiva, entre otras), para posteriormente ser tratada mediante software especializado (ArcGIS) y así caracterizar la cuenca. Igualmente, es de gran importancia el obtener información relacionada con estudios realizados en la zona o que contengan las cuencas de estudio, ya sean de carácter público o privado para tener en cuenta el ordenamiento y la planeación proyectada. La información histórica de registros hidroclimatológicos es útil para conocer la continuidad con que han sido registrados, los equipos utilizados y también para buscar entender a nivel general el comportamiento hidrológico de las cuencas.

Los sitios idóneos para el emplazamiento de los diferentes aparatos de medición de variables hidroclimatológicas están sujetos a indicaciones, recomendaciones y restricciones dadas por la OMM y el IDEAM, las variables a medir son asociadas con el comportamiento hidrológico que esta pueda presentar además de los lapsos de tiempo en que deben ser medidas. Los sitios de emplazamiento para estas estaciones salen de un procesamiento geoestadístico de la información secundaria junto con las recomendaciones de las instituciones (OMM, IDEAM). En cuanto a la selección de los aparatos de medición, esto está sujeto a la información disponible por parte de proveedores especializados y del cumplimiento de las especificaciones mínimas necesarias.

### 2.2 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde principalmente a las cuencas de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. Dichas cuencas poseen área rural y urbana de la ciudad de Tunja. No obstante, es considerada como zona general de estudio la totalidad de Tunja en su área urbana y rural como se puede ver en el mapa 2.

2.2.1 Generalidades del municipio de Tunja. La capital de Boyacá registra doscientos (200) desarrollos urbanísticos en la zona urbana y diez (10) veredas en el sector rural, como son: Barón Gallero, Barón Germania, Chorroblando, El Porvenir, La Esperanza, La Hoya, La Lajita, Pírgua, Runta y Tras del Alto. El río Jordán que atraviesa a la ciudad de sur a norte y el río La Vega que va de occidente a oriente, se consideran sus principales fuentes hídricas. El municipio limita por el NORTE, con los municipios de Motavita y Cómbita; al ORIENTE, con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá; por el SUR, con Ventaquemada; y por el OCCIDENTE, con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora. La extensión total es de 121.49 km<sup>2</sup>, la extensión del área urbana de 19.76 km<sup>2</sup>, la extensión del área rural de 101.72 km<sup>2</sup>, la altitud de la cabecera municipal de 2872 m (metros sobre el nivel del mar), y la temperatura media es de 13 grados centígrados (° C). <sup>44</sup>

2.2.2 Cuenca del río La Vega. El río nace en la parte norte del municipio de Motavita a 3250 m.s.n.m (vereda el Frutillal) con el nombre de Quebrada Honda, hasta los límites de Sora. Se une a la Quebrada Puertas y Quebrada Salitre para formar un solo cauce, donde toma el nombre de Farfacá (a la altura de la escuela El Chuscal en Sora) hasta los límites de Tunja. Este río se une a la Quebrada Piedra Gorda (en las Juntas, Sora) y continúa hasta su desembocadura recibiendo el nombre de río La Vega o Teta de Agua (2770 m.s.n.m.). El cauce principal de la Cuenca posee quebradas que le sirven de afluentes (en invierno): en Motavita, Quebrada Seca, El Infierno, Fusachá, Piedra Colgada, Las Puertas; en Tunja, El Cangrejo y La Fuente; en Sora, Piedra Gorda y El Salitre<sup>45</sup>.

2.2.3 Cuenca del río Jordán. El río Jordán nace a una altura aproximada de 3.100 m.s.n.m. en la cuchilla la Sierra, que está ubicada al occidente de Tunja. Este río pasa por el municipio de Tunja para descargar sus aguas en la confluencia con el río La Vega. El río Jordán tiene una longitud de 37,35 km y recibe las aguas del río Farfacá con una longitud de 10,37 km, recoge las escorrentías superficiales desde una altura cercana a los 3.200 m. La cuenca del río Jordán tiene un área de 31.800 hectáreas y se caracteriza por ser una zona muy seca y de suelos poco fértiles<sup>46</sup>.

2.2.4 Cuenca del río Chulo. Aunque popularmente el río Jordán es llamado río Chulo por los habitantes de la ciudad de Tunja, tras revisiones realizadas sobre cartografía, es posible observar que el río Chulo inicia en la confluencia del río Jordán y el río La Vega, comenzando a la altura del Centro Comercial Centro Norte, continuando su curso por la zona nororiental y pasando por los municipios

---

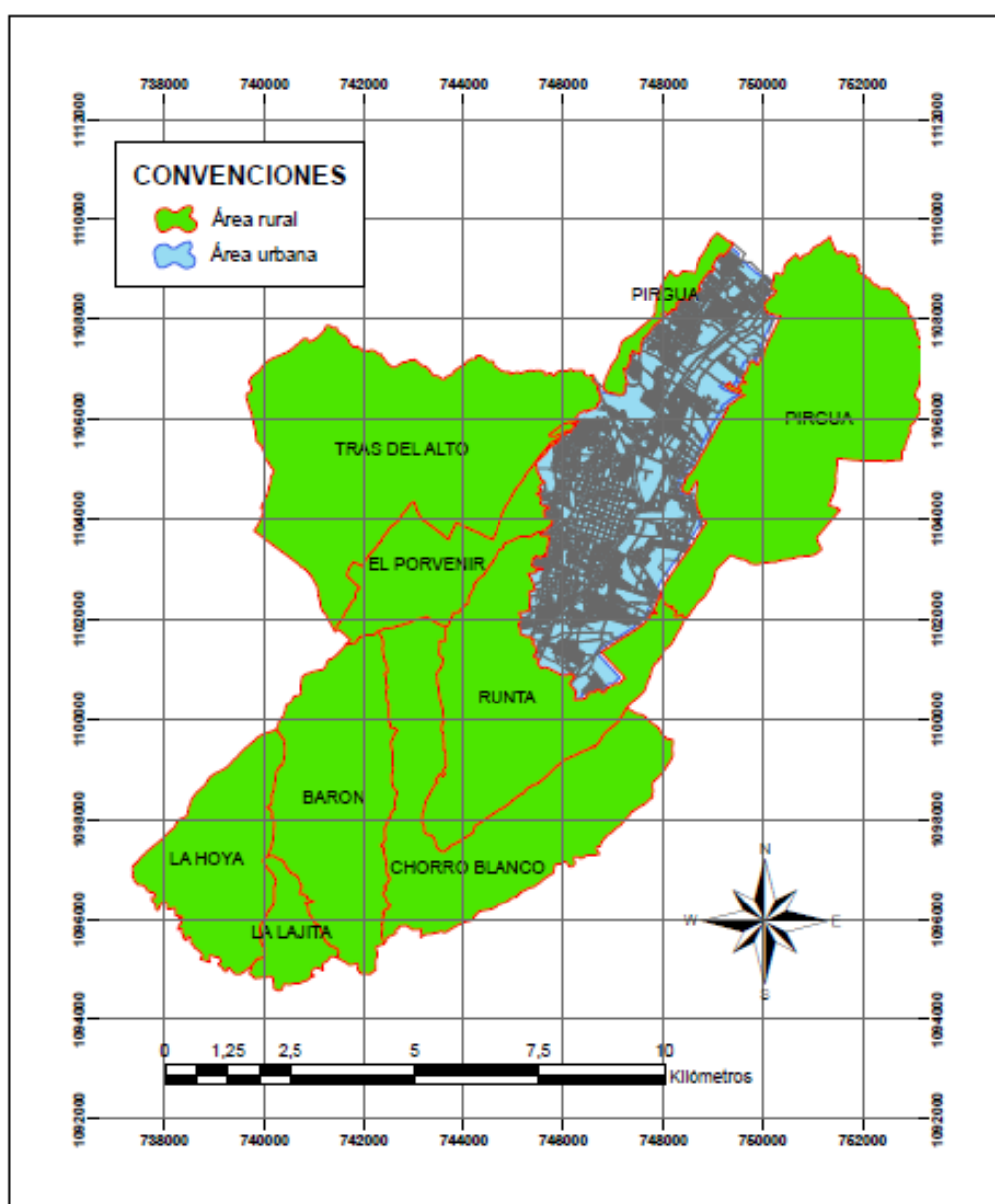
44 TUNJA, Municipio de. Nuestro Municipio. [En línea]. Tunja: Alcaldía Municipio de Tunja. 2017. Disponible en: [http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml).

45 TUNJA. CONSEJO MUNICIPAL. Acuerdo municipal No. 0016. 2014 (28, Julio, 2014). Plan de Ordenamiento Territorial. Diario Oficial. Tunja. Anexo Físico-Biótico. 27 p.

46 TUNJA. CORPOBOYACA. Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca alta del río Chicamocha. 2006. (31, Julio, 2006). POMCA. Diario oficial. Tunja. Diagnostico capítulo I. 311 p.

de Cómbita y Oicatá hasta su desembocadura en el embalse La Playa del municipio de Tuta.

Mapa 2. Zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

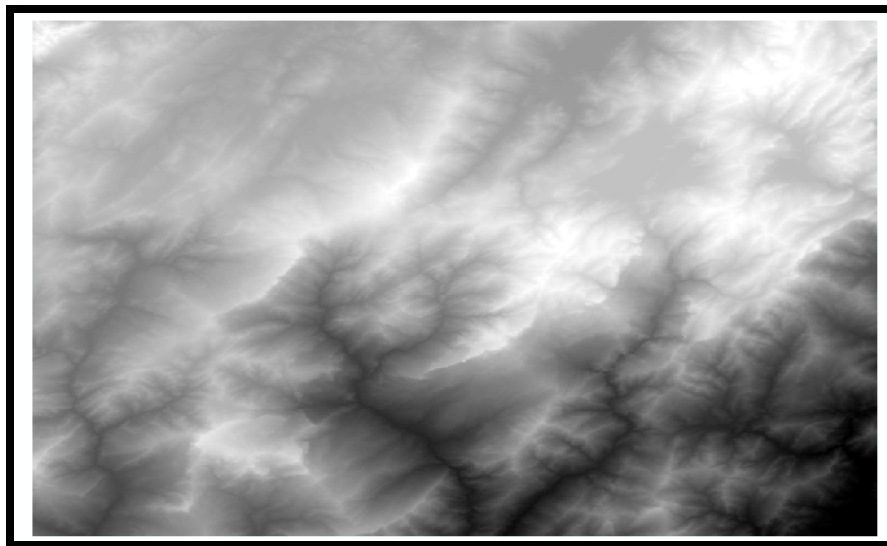
## 2.3 RECOPIACIÓN INFORMACIÓN SECUNDARIA

La información secundaria se refiere a la información cartográfica de la ciudad de Tunja, ya sean documentos públicos o privados que contengan planos de la distribución urbanística, líneas de servicios públicos, mapas de riesgo, malla vial, curvas de nivel o modelos digitales de elevación. Para estos últimos es posible obtenerlos de diferentes plataformas virtuales con resoluciones que van desde los 30 metros hasta los 10 metros, todos estos para descarga libre.

2.3.1 Cartografía base. Esta actividad consistió en la recolección de la información correspondiente a cartografía base de la ciudad de Tunja, en formato digital obtenida del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), suministrada por la oficina de planeación municipal, la cual corresponde a: mapas de sus límites urbanos, rurales, manzanas, predial, vías, taludes, entre otros.

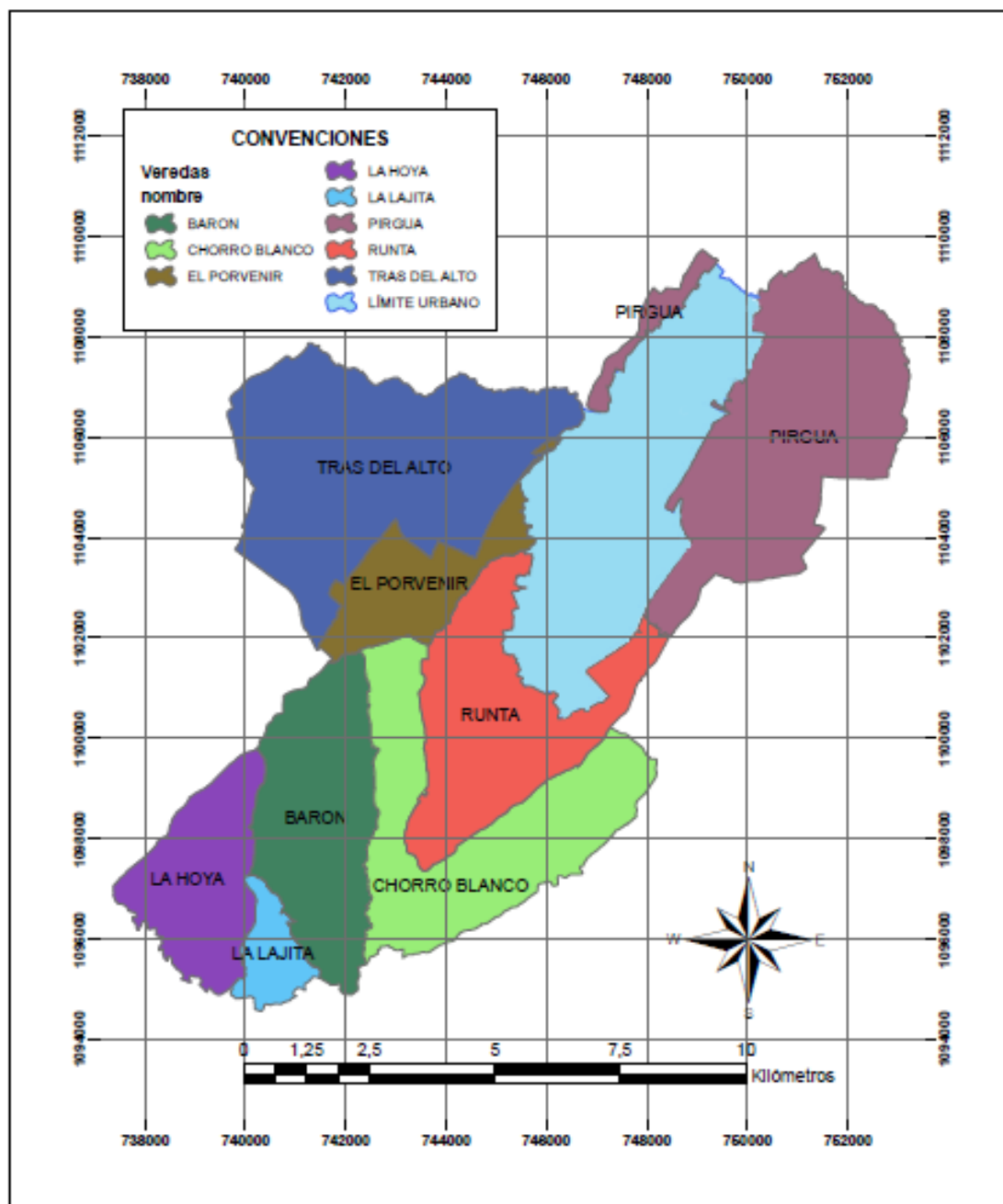
2.3.2 Modelos digitales de elevación provenientes de sensores remotos. Fueron obtenidos tres MDE “modelos digitales de elevación” provenientes de sensores remotos. Uno proporcionado por la Corporación autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá) con una precisión de 30 m, otro del portal Geosur “Red Geoespacial de América Latina y el Caribe” con una precisión de 30 m, y el más preciso descargado del Alaska Satellite Facility con una precisión de 12,5 m y el cual será utilizado en nuestro estudio.

Imagen 6. Modelo de elevación digital.



Fuente: ALASKA SATELLITE FACILITY: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>.  
Autores.

Mapa 3. Limite Urbano y Rural.



Fuente: Cartografía base IGAC Escala 1: 25000 Acuerdo 014 de 2001 POT Tunja, Autores

2.3.3 Cartografía temática. Fue recolectada cartografía temática del POT de la ciudad de Tunja, como mapas de uso de suelo y tipos de suelo.

2.3.4 Fotografías aéreas. Se recolectaron fotografías de vuelos de los años: 1939, 1970, 1981, 1992, 1993, 2004 y 2005 suministradas por el laboratorio de geomática de la UPTC, obtenidas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi "IGAC".

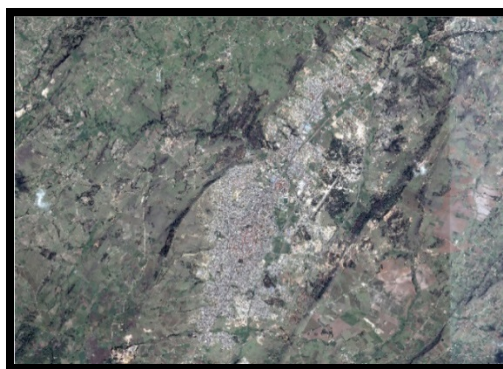
Imagen 7. Fotografía aérea de Tunja.



Fuente: IGAC C-2474. 23 de diciembre de 1993. Escala 1:46100

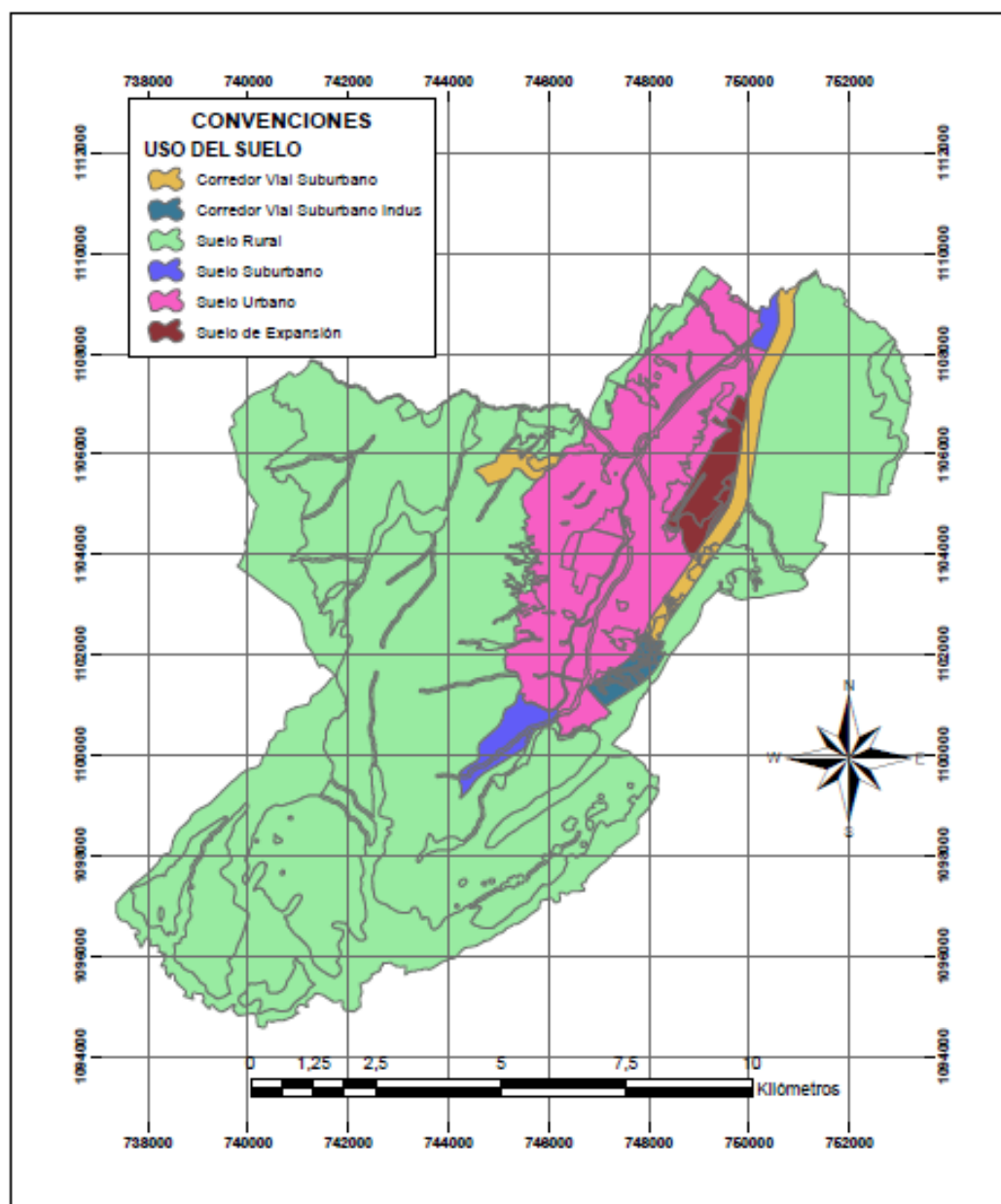
2.3.5 Imágenes de satélite. Se obtuvieron imágenes de diferentes satélites descargadas de varios portales como: el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), Environmental System Reserarch Institute (ESRI), Bing (propiedad de Microsoft), The Global Land Cover Facility (GLCF) y Google Earth.

Imagen 8. Imagen satelital de Tunja.



Fuente: Google Earth.

Mapa 4. Uso del suelo en Tunja



Fuente: Cartografía base IGAC Escala 1: 25000 Acuerdo 014 de 2001 POT Tunja, Autores.



2.3.6 Estudios existentes relacionados con la zona de estudio. Se recolectaron estudios como el POT de la Ciudad de Tunja, los EOT de los municipios limítrofes como: Combita, Motavita, Oicatá, Soracá y Tuta; también se cuenta con el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Alta del Río Chicamocha (POMCA).

2.3.7 Planos generales del sistema de alcantarillado de la ciudad de Tunja. Se cuenta con los planos generales del sistema de alcantarillado de la ciudad de Tunja en formato digital, en los que se encuentran pendientes, materiales, diámetros y pozos de inspección; suministrados por la empresa PROACTIVA AGUAS DE TUNJA S.A

2.3.8 Registros históricos de la estación meteorológica de la UPTC. Se recopilaron los registros climatológicos históricos de la estación meteorológica de la UPTC, desde el año 1980, hasta junio de 2017, entre los que se encuentran variables como: temperatura, radiación, humedad, precipitación, evaporación, velocidad del viento, nubosidad, y fenómeno atmosférico.

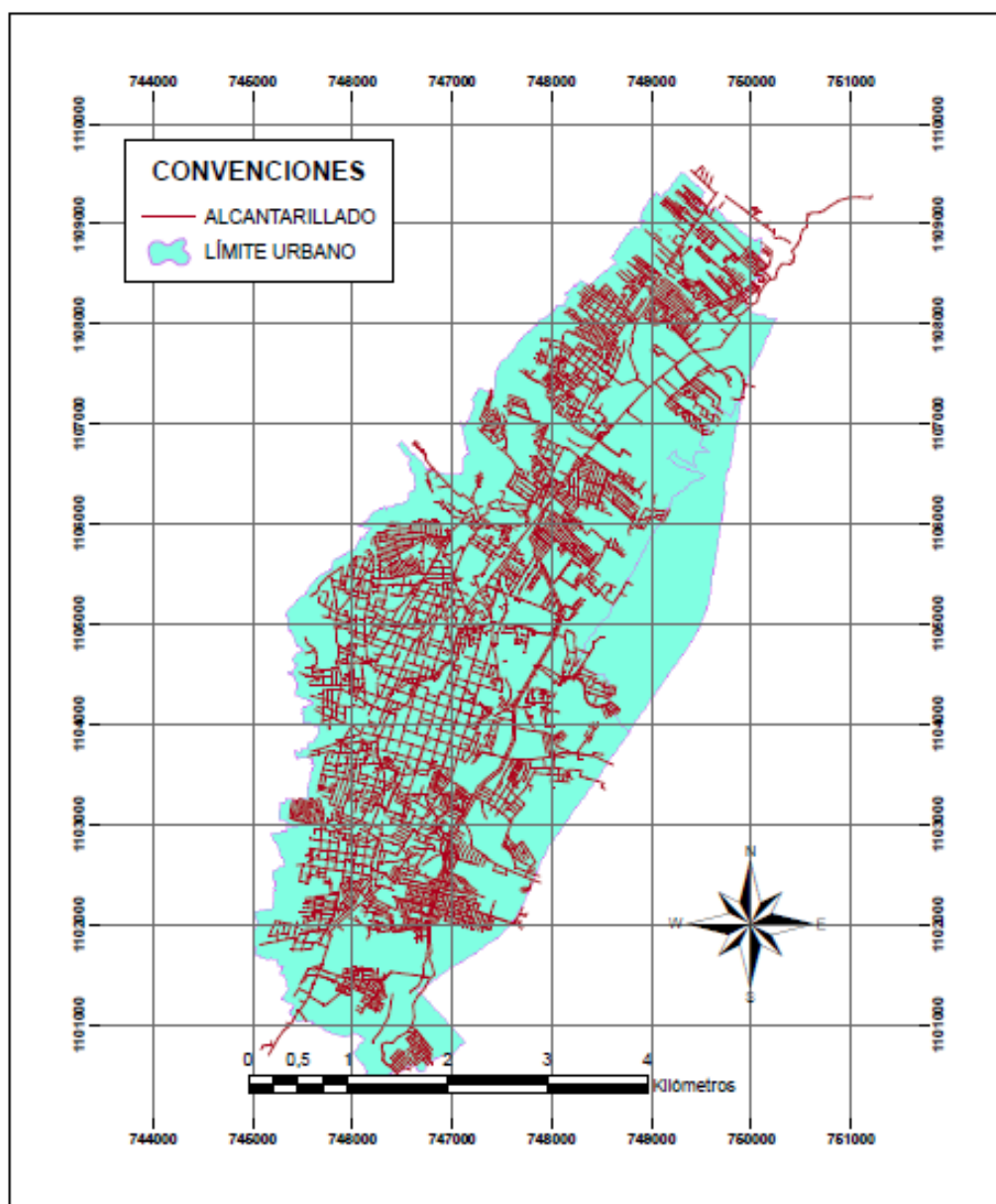
Imagen 9. Informe climatológico estación UPTC.

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA												
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS												
ESCUELA DE AGRONOMÍA												
ESTACION CLIMATOLOGICA												
INFORME CLIMATOLOGICO												
LOCALIZACION: ALTITUD: 2.890 msnm.												
LATITUD: 06º 00' 33" N.												
LONGITUD: 75º 00' 30" W (Grw.)												
AÑO: 2019												
MESES	JUNIO			RADIACIÓN		Humedad, %	Viento, m/s	Temperatura, °C	Velocidad Viento, m/s	Nubosidad, %	Fen. atm.	Precip. mm
DÍA	Temperatura, °C	Humedad, %	Radiación, mJ/m²	Global, mJ/m²								
1	15.8	9.4	17.4	5.1	474.35	82.8	0.0	3.25	0.71	2.5.1	-	-
2	14.8	10.0	18.3	5.0	415.45	79.5	0.0	3.75	0.88	3.3.2	-	-
3	13.5	10.6	19.2	4.8	503.30	78.0	0.0	3.85	0.82	2.0.0	-	-
4	13.8	10.2	17.2	4.0	419.84	78.0	0.4	3.88	0.89	2.0.0	-	-
5	13.5	9.6	17.2	7.8	551.30	77.6	1.8	3.96	1.32	3.5.2	-	-
6	13.9	10.0	16.4	5.9	445.20	81.3	0.0	3.22	0.97	2.0.0	-	-
7	13.8	9.8	17.0	5.5	525.40	74.3	0.0	4.12	1.16	2.0.0	-	-
8	15.1	8.4	17.4	2.4	348.96	83.0	1.0	2.16	0.76	2.0.0	-	-
9	15.3	10.4	16.2	0.8	360.40	80.6	1.2	1.12	0.76	3.5.1	-	-
10	15.3	9.4	17.2	5.3	557.36	80.0	0.0	4.60	0.88	3.5.2	-	-
11	15.2	7.0	19.0	7.8	555.36	77.6	0.8	4.84	1.01	2.0.0	-	-
12	15.2	10.8	19.0	4.4	455.36	82.5	0.3	4.88	0.74	2.0.0	-	-
13	14.0	9.0	17.4	5.4	487.80	77.3	0.0	3.58	0.97	2.0.0	-	-
14	13.8	10.4	18.2	1.1	254.45	83.6	8.0	1.35	0.49	2.0.0	-	-
15	15.1	11.0	18.2	5.4	373.10	79.3	0.0	2.48	0.76	2.0.0	-	-
16	13.4	10.0	16.4	2.1	318.00	83.0	1.8	0.81	0.71	2.0.0	-	-
17	13.1	10.0	16.2	2.0	307.40	82.3	0.0	1.88	0.83	3.5.2	-	-
18	13.1	10.4	18.2	2.8	471.36	78.3	0.3	2.50	0.75	2.0.0	-	-
19	13.1	9.2	18.4	0.8	231.08	80.6	10.8	1.44	0.43	3.5.2	-	-
20	11.7	9.2	18.4	0.8	231.08	80.6	10.8	1.44	0.43	3.5.2	-	-
21	13.8	9.8	18.0	8.0	485.80	80.3	4.3	2.88	0.80	2.0.0	-	-
22	15.3	11.0	18.4	7.8	313.36	83.6	1.5	1.04	0.48	2.0.0	-	-
23	13.4	9.0	17.8	7.1	551.20	80.5	13.5	8.00	0.89	2.0.0	-	-
24	13.4	8.8	18.8	4.1	468.40	79.0	0.0	3.24	0.75	2.0.0	-	-
25	12.8	7.4	16.8	2.0	249.20	83.0	0.8	1.24	0.69	2.0.0	-	-
26	12.8	7.4	16.8	2.0	249.20	83.0	0.8	1.24	0.69	2.0.0	-	-
27	13.0	11.2	15.8	1.7	362.88	86.3	0.1	2.22	0.86	3.5.2	-	-
28	13.2	10.0	16.8	3.3	323.80	83.3	6.1	1.88	0.78	3.5.2	-	-
29	15.1	9.8	17.4	4.4	551.80	79.3	0.0	2.94	0.85	3.5.2	-	-
30	13.0	10.0	17.4	4.0	458.72	77.3	0.0	3.02	0.85	3.5.2	-	-
31												
Vr/Mes	13.4	9.6	17.4	136.6	12,600.00	80.7	66.1	27.32	0.82	-	-	-

Fuente: Oficina Vento - Newton A. Gonzalez C.

Fuente: Universidad pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía. Estación Climatológica. IDEAM.

Mapa 5. Sistema de alcantarillado de Tunja.



Fuente: PROACTIVA AGUAS DE TUNJA S.A, Autores.

2.3.9 Información de equipos y proveedores de instrumentación hidrometeorológica. Se cuenta con varios catálogos de proveedores nacionales e internacionales de última tecnología en instrumentación hidrológica, entre los que se destacan países como Argentina, España y Estados Unidos.

## 2.4 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN FISIOGRAFICA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS.

A continuación, se muestran los parámetros morfométricos y morfológicos que se hallaron a la cuenca de estudio. Así como la información necesaria, fórmulas, software y técnicas implementadas para el cálculo de los mismos.

### 2.4.1 Delimitación y ubicación de la cuenca.

2.4.1.1 Delimitación, área y perímetro. La delimitación de la cuenca se hizo trazando la divisoria de aguas con base en un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido previamente, con resolución espacial de 12,5 m x 12,5 m y altimétrica de 12.5 m; apoyados con el software ArcGis y su extensión ArcHydro; de cuya delimitación se obtuvieron sus dos principales parámetros de área y perímetro.

2.4.1.2 Partes de la cuenca. Se subdividió la cuenca mediante el software ArcGis en cuencas: alta, media y baja; Como resultado de la división en tres partes iguales de su intervalo de altitud. Obteniendo también sus respectivas áreas.

2.4.1.3 Orientación y posición de la cuenca. Luego de haber delimitado la cuenca se pudo observar su correcta ubicación y disposición geográfica, así como los municipios que hacen parte de ella y la orientación del cauce principal. Lo anterior con el apoyo del software ArcGis.

### 2.4.2 Parámetros morfológicos.

Los parámetros morfológicos son relaciones de forma, relieve, área, red de drenaje etc. que deben abordarse para una adecuada caracterización y correcta descripción de una cuenca hidrográfica. Entre los que se encuentran los más representativos a continuación.

2.4.2.1 Factor de forma (Kf). Está definido por la relación existente entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud axial, debido a que el ancho promedio es igual al área de la misma sobre la longitud axial así:

$$a = \frac{A}{Lax} \quad (1)$$

Entonces el factor de forma (Kf) queda expresado como el área de la cuenca sobre la longitud axial al cuadrado:

$$Kf = \frac{A}{Lax^2} \quad (2)$$

Donde la longitud axial de la cuenca se tomó la longitud del cauce principal con ayuda del software. “Un valor de  $K_f$  superior a la unidad nos dará el grado de achatamiento de la cuenca o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas”<sup>47</sup>.

2.4.2.2 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius ( $K_c$ ). Es la comparación que se hace de la cuenca con un círculo de igual área, y se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y dicha circunferencia de la cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$Kc = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Este coeficiente tiene un valor de 1 para cuencas perfectamente redondas, nunca existirá un valor de  $K_c$  menor a 1, y cuanto más cercano se encuentre este a la unidad la cuenca tenderá a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento<sup>48</sup>.

2.4.2.3 Índice de alargamiento ( $R_a$ ). “Este índice propuesto por Horton relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente”<sup>49</sup>. Del que se desprende la siguiente ecuación:

$$Ra = 1.128 * \frac{\sqrt{P}}{Lax} \quad (4)$$

Los valores de clasificación del terreno se muestran en la tabla 30.

2.4.2.4 Índice asimétrico. Es el resultado de la división entre el área mayor y menor de la cuenca, separadas por el cauce principal.

---

<sup>47</sup> JIMENEZ ESCOBAR, Henry. Hidrología Básica 1: La cuenca hidrográfica. Segunda Edición corregida. 1986. 249 p.

<sup>48</sup> Ibid., p. 29

<sup>49</sup> Ibid., p. 29

$$I_{as} = \frac{A_{mayor}}{A_{menor}} \quad (5)$$

Este valor indica la homogeneidad de la distribución en la red de drenaje; si se tienen valores mucho mayores a la unidad se entenderá que el cauce principal está bastante recargado sobre una de las vertientes<sup>50</sup>.

2.4.2.5 Relación de circularidad (RC). Relaciona el área de la cuenca en cuestión con el área de un círculo de igual perímetro. Cuanto menor sea el valor que tome Rc, indicará un perímetro superior al que le correspondería al círculo asociado; es decir, indicará cuencas muy lobuladas, y valores cercanos a 1 indicarían que la cuenca se asemeja a una forma circular.

$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (6)$$

2.4.2.6 Extensión media de la escorrentía superficial. “Se define como la distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una hoya, en caso de que la escorrentía se diese en línea recta desde donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo al lecho de una corriente cualquiera de la hoya”<sup>51</sup>. La extensión media de la escorrentía está dada por la siguiente expresión:

$$i = \frac{A}{4L} \quad (7)$$

$i$  = Extensión media de la escorrentía superficial, en Km

$L$  = Longitud total de las corrientes de agua en la hoya hidrográfica, en Km

$A$  = Área de drenaje total de la hoya, en Km<sup>2</sup>

2.4.3 Relieve de la cuenca.

2.4.3.1 Curva hipsométrica. La curva hipsométrica relaciona el valor de la cota en ordenadas con el valor del área acumulada en abscisas. Su construcción se puede realizar mediante la organización de las cotas de la cuenca (curvas de nivel). Se

<sup>50</sup> Ibid., p. 30

<sup>51</sup> MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería 1995. 359p.

organizan en clases o intervalos y se toma el área entre las curvas de nivel y se asocia directamente el acumulado hasta el momento al intervalo de clase. Es la representación gráfica del relieve de la cuenca.

Mediante la implementación de las curvas de nivel obtenidas del Modelo Digital de Elevación (DEM), y con la ayuda del software Arc Gis; es posible hallar el área entre cada una de estas y así poder representar gráficamente su cota media en función del área acumulada de las mismas.

2.4.3.2 Elevación mediana de la cuenca según la curva hipsométrica. “se denomina elevación mediana de una cuenca hidrográfica, aquella que determina la cota de la curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas de igual área, es decir la elevación correspondiente al 50% del área total”<sup>52</sup>. Al realizar dos gráficas de curva hipsométrica, una del valor medio de la cota versus el porcentaje de área acumulada bajo la curva; y otra, del valor medio de la cota versus el porcentaje de área acumulada sobre la curva. Es posible hallar un valor medio de la elevación de la cuenca en el punto donde estas dos curvas se cruzan.

2.4.3.3 Determinación de la elevación media de la cuenca por el método de área – elevación. La elevación media es un promedio que se obtiene; de la sumatoria de las áreas multiplicadas por el valor de la elevación que estas tienen, y dividiéndola en el total del área de la cuenca hidrográfica. Para poder estimar la elevación media por este método es necesario contar con las curvas de nivel y el área entre ellas. Cuyos valores obtenemos al realizar un análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM) con la herramienta Arc Hidro para posteriormente poder aplicar la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * e_i}{A_t} \quad (8)$$

$E_m$ : Elevación media de la curva en metros.

$A_i$ : Área de cada franja, en Km<sup>2</sup> o en mts<sup>2</sup> de acuerdo con el tamaño de la Cuenca.

$e_i$ : Promedio de las curvas de nivel que delimitan cada franja.

$A_t$ : Área total de la cuenca en Km<sup>2</sup> o en mts<sup>2</sup>.

2.4.3.4 Coeficiente de masividad (Km). Es la relación que existe entre la elevación de la cuenca y su superficie.

---

<sup>52</sup> JIMENEZ ESCOBAR, Henry. Hidrología Básica 1: La cuenca hidrográfica. Segunda Edición corregida. 1986. 249 p.

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca Km}^2} \quad (9)$$

Este valor toma valores bajos en cuencas montañosas y altos en cuencas llanas.

2.4.4 Cálculo de la pendiente media y mediana mediante software. El cálculo de la pendiente media y mediana se hizo mediante la manipulación y tratamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) con el software ArcGis, realizando un tratamiento estadístico con su extensión ArcHydro, del que se pudo extraer también un mapa de pendientes.

2.4.5 Determinación de la pendiente por el método de Alvord. Para el cálculo de la pendiente por el método de Alvord es necesario conocer la longitud de cada curva de nivel, su desnivel de una curva a otra y el área de la cuenca. La pendiente media se calcula como la multiplicación de la sumatoria de la longitud de las curvas de nivel multiplicada por su equidistancia, y todo esto dividido por el área de la cuenca así:

$$S_m = \frac{DL}{A} \quad (10)$$

Donde;

$S_m$ : Pendiente media de la cuenca en Km

$D$ : Equidistancia entre curvas de nivel

$L$ : Sumatoria de la longitud de las curvas de nivel

$A$ : Área de la cuenca

#### 2.4.5 Drenaje.

A continuación, se muestra el cálculo de los parámetros relacionados con los drenajes de la cuenca hidrográfica. Así como las ecuaciones y metodologías que la describen.

2.4.5.1 Cálculo de la pendiente del cauce principal por el método de Taylor-Shwarz. Este método consiste en dividir el cauce principal en intervalos de igual longitud hallando sus cotas y calculando sus pendientes como si se tratara de un canal recto. Entre más divisiones se hagan del cauce principal mejor será la estimación de su pendiente media siguiendo la siguiente expresión:

$$S_m = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (11)$$

Siendo:

$n$ : Número de tramos de igual longitud en que se ha dividido el río

$S_1, S_2, \dots, S_n$ : Pendientes de cada tramo del río, las cuales se estiman por valores extremos.

2.4.5.2 Cálculo de la pendiente por el método de valores extremos. Consiste en determinar el desnivel  $\Delta H$  entre los puntos más elevado y más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce  $L$  esto es:

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad (12)$$

2.4.5.3 Cálculo de la pendiente por el método de compensación de áreas. "Consiste en una línea trazada desde el punto más bajo del río y que el cortar el perfil de río tratando de ajustarse a él, determine dos áreas entre el perfil y la recta. Estas dos áreas, una por encima de la línea limitada por el perfil y la otra por debajo de ella e igualmente delimitada por el perfil del río en su parte inferior, deben ser iguales"<sup>53</sup>.

Se determina la pendiente de igual manera que en el método de valores extremos, sólo que el desnivel  $\Delta H$  será entre el punto más alto de la recta de compensación de áreas y el más bajo, la longitud  $L$  será la misma longitud de la corriente principal de agua.

Este método se realizó obteniendo el perfil del cauce principal del software ArcGis, luego exportando los datos a una hoja de cálculo y exagerando sus cotas diez veces, para luego exportar los puntos al software AutoCAD y realizar así la compensación de áreas.

2.4.5.4 Perfil del cauce principal. Este perfil se obtiene directamente del software ArcGis mediante el tratamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM).

2.4.5.5 Análisis de la red de drenaje. Para determinar el orden del cauce principal de la cuenca en estudio se realizó un mapa sobre el cual se designó a cada segmento su orden correspondiente según la metodología de Strahler, donde el segmento más largo del cauce corresponde al de mayor orden.

2.4.5.6 Densidad de drenaje. La densidad de drenaje se calculó dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene según la siguiente expresión:

---

<sup>53</sup> JIMENEZ ESCOBAR, Henry. Hidrología Básica 1: La cuenca hidrográfica. Segunda Edición corregida. 1986. 249 p.



$$D_d = \frac{L}{A} \quad (13)$$

Siendo:

$L$ : Longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en Km

$A$ : área de la cuenca en Km<sup>2</sup>

“A fin de catalogar una cuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje; se puede considerar que valores de  $D_d$  próximos a 0,5 km/ Km<sup>2</sup> corresponden a una cuenca pobremente drenada mientras que valores de 3,1 km/ Km<sup>2</sup> o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje”<sup>54</sup>

2.4.5.7 Coeficiente de torrencialidad. Índice que mide el grado de torrencialidad de la cuenca, por medio de la relación del número de cauces de orden uno con respecto al área total de la misma, a mayor magnitud, mayor grado de torrencialidad presenta una cuenca:

$$C_t = \frac{\# \text{ cauces orden } 1}{A} \quad (14)$$

2.4.5.8 Sinuosidad. Relación existente entre la longitud del cauce principal medida a lo largo del cauce ( $L$ ) y la longitud del valle del mismo cauce principal, medida en línea curva o recta ( $L_t$ ) según la siguiente expresión:

$$S = \frac{L}{L_t} \quad (15)$$

Según lo visto en el curso de hidrología, un valor de sinuosidad menor o igual a 1.25 está relacionado con baja sinuosidad.

2.4.5.9 Relación de bifurcación. Proporción existente entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediatamente superior así:

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1} \quad (16)$$

---

<sup>54</sup> Ibid., p. 57

Representa una medida de la estructura de las redes, permite observar la similitud geométrica entre sistemas de drenaje, tiende a permanecer constante entre niveles si las condiciones como clima, geología, suelos, etc.

## 2.5 ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.

El mercado ofrece una gran cantidad de posibilidades para la instrumentación, entre las que se encuentran estaciones compactas, las cuales pueden medir más de una variable, como también las que miden cada variable por separado, algunas tienen su sistema de comunicación y transferencia de datos incluido o separado, así como también el sistema de almacenamiento. Otro tipo de estaciones muy comunes son las estaciones portátiles o móviles las cuales cuentan con buena precisión, aunque para este proyecto no fueron consideradas, ya que para la red que se pretende diseñar los aparatos de medición será fijos.

La OMM exige parámetros mínimos relacionados con la precisión y la forma como deben medirse y almacenarse las variables, con el fin de garantizar homogeneidad en los registros en caso de que estos datos sean utilizados en estudios regionales a gran escala, parámetros que cumplen las empresas fabricantes, los cuales especifican en los folletos de los productos.

Para las mediciones hidrométricas se tiene la posibilidad de miras limnimétricas, flotadores o sensores electrónicos, estos últimos presentan gran ventaja ya que son de menor tamaño lo cual facilita su instalación. Existen empresas con una larga trayectoria en la fabricación de este tipo de instrumentación en su mayoría son empresas europeas o norteamericanas, pero también existen empresas latinoamericanas fabricantes de estos productos, las cuales se encuentran establecidas en Argentina y México.

## 2.6 SELECCIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.

Esta se hizo teniendo en cuenta la precisión de medida del aparato, el mantenimiento que esta requiere, la facilidad de uso e instalación y no de menor importancia el precio, así como los costos de importación en caso de que la empresa no tenga representación directa en Colombia. Se consideró el precio como el factor decisivo en la selección de la tecnología a utilizar.

## 2.7 PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RED DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO.

Para el planteamiento de la red hidrometereológica se hizo uso de la extensión de análisis geoestadístico del software ArcGis, realizando la interpolación de

predicción por medio del Kriging. Para esto fue necesario contar con registro históricos de una variable a modelar, en este caso se tomaron los datos de precipitación media anual de las estaciones seleccionadas previamente bajo el criterio que estuvieran ubicadas dentro la cuenca objeto de estudio, y hasta un radio máximo de 4 kilómetros alrededor de la misma, para tener una mayor cobertura y puntos de información para la predicción a través del modelo de interpolación espacial.

Los datos utilizados para esta interpolación espacial corresponden a los valores de precipitación total mensual agregados a nivel anual para un periodo homogéneo y continuo. Con estos datos se realizó la interpolación espacial, la cual permite obtener como resultado un mapa de distribución espacial de la precipitación para la cuenca, así como el mapa de error en la estimación, el cual permite inferir sobre la óptima ubicación de las nuevas estaciones. Para la cuenca urbana fue realizada una sectorización mediante la agrupación de sectores en la ciudad con características urbanísticas similares, según recomendaciones de la OMM, en donde cada sector tendría su estación meteorológica. En la cuenca rural la sectorización se realizó por medio del análisis de elevaciones. La cantidad de estaciones por unidad de área (densidad de estaciones) fue establecida considerando recomendaciones generales de la OMM y experiencias internacionales de gran importancia y actualidad.

2.7.1 Identificación de zonas urbanas para la ubicación de instrumentación meteorológica. Siguiendo las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) según la Figura número 2. *“Clasificación simplificada de distintas formas urbanas organizadas por orden decreciente aproximado de su capacidad para afectar al clima local (Oke, 2004, sin publicar)”* del capítulo 1.3 de este documento. Se realizó la división del casco urbano para la ciudad de Tunja en once (11) zonas climatológicas urbanas, ubicando sus respectivos centroides, a excepción de una zona ubicada en la UPTC, y cuyo centroide se desplazó a las coordenadas de la estación climatológica ya existente allí, para poder realizar un adecuado análisis geoestadístico posterior.

2.7.2 Identificación de tramos y lugares de medición para variables hidrométricas en los principales afluentes de la cuenca en estudio. Se identificaron cuatro (4) lugares estratégicos para la implementación de sensores de medición de caudal, en los principales afluentes de la cuenca en estudio; con el fin de poder calibrar modelos hidrológicos con una buena precisión para estudios posteriores.

2.7.3 Análisis geoestadístico de ubicación óptima de las estaciones meteorológicas. Se realizó un análisis geoestadístico utilizando la precipitación media anual (Pm) de las estaciones meteorológicas existentes dentro de la cuenca, y las más próximas en un radio de 4 kilómetros, medidos desde el perímetro de la misma. A partir de este análisis fue obtenido un mapa de error mediante el empleo del software ArcGis, utilizando sus métodos de interpolación

de Kriging ordinario e Inverso de la Distancia (IDW), para luego emplear la validación cruzada, y a través de los errores evidenciar los lugares en donde sería necesaria la ubicación de nuevas estaciones.

Posteriormente fue realizado el mismo procedimiento incluyendo las diez (10) nuevas estaciones ubicadas en los centroides de las zonas climatológicas urbanas previamente definidas, así como la inclusión de doce (12) nuevas estaciones en el sector rural de la cuenca, distribuidas equitativamente entre cuenca alta, media y baja. Como dato de precipitación media anual (Pm) se utilizó el promedio de las siete (7) estaciones ya existentes, esto con el fin de que la interpolación fuese netamente reducida al empleo de los atributos espaciales de la variable y minimizar los posibles errores atribuibles a la magnitud de la precipitación.

2.7.4 Planteamiento de la red de instrumentación hidrometeorológica y elaboración de cartografía. Luego del análisis geoestadístico se procedió a hacer pequeñas modificaciones en la ubicación de estaciones rurales, con el fin de optimizar al máximo la distribución y reducir los errores producidos por la distancia. De lo anterior se obtuvo una distribución considerada la mejor; plasmada mediante planos cartográficos que se presentan como anexos en este documento.

### 3. ANALISIS Y RESULTADOS

En el siguiente capítulo se encontrará el desarrollo de las actividades planteadas en la metodología, y el resultado de esta investigación donde se tienen en cuenta las recomendaciones de las organizaciones nacionales e internacionales, la caracterización de la cuenca de estudio y los instrumentos de medición adoptados desde un punto de vista técnico y económico.

#### 3.1 ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES.

Según las recomendaciones de la OMM para instrumentación hidrometeorológica en cuencas urbanas, se adoptó la división de la ciudad de Tunja en zonas climatológicas urbanas; en donde se recomienda la instalación de una estación hidrometeorológica para cada una de ellas, también se sugiere tener en cuenta la utilización de mástiles para la instalación de las mismas según recomendaciones de la OMM.

En cuanto a las recomendaciones para zonas rurales, se tendrá en cuenta un valor de densidad de: una (1) estación por cada diez (10) km<sup>2</sup>, según recomendaciones de la OMM. En cuanto a la medición de caudales en los principales afluentes de la cuenca en estudio, se tendrá en cuenta las recomendaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), descritas en el capítulo 1.4.2 de este documento en lo concerniente a los requerimientos técnicos de la sección de aforo.

#### 3.2 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN FISIOGRAFICA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS.

3.2.1. Delimitación, área y perímetro. En el mapa No. 6 se muestra la cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo delimitada por su divisoria de aguas y a través de una imagen satelital de Google Earth.

El área de la cuenca medida directamente del software Arc-Gis fue de 163,54Km<sup>2</sup>, y con un perímetro de 95,75Km; cuya clasificación por área nos define nuestra área de estudio bajo el orden de sub cuenca (100 – 300) Km<sup>2</sup> como se puede observar en el mapa No. 7.

3.2.2 Partes de la cuenca. Se realizó la división de la cuenca en tres partes como se puede observar en el mapa No. 8 así.

Parte alta: (3111-3335) m.s.n.m

Garganta: (2888-3111) m.s.n.m

Lecho: (2665-2888) m.s.n.m

Se puede apreciar que la parte alta de la cuenca no cuenta con un área significativamente mayor, predominando la extensión de la parte baja y media.

3.2.3 Orientación y posición de la cuenca. En el mapa No. 9 se puede apreciar que la cuenca de estudio abarca principalmente los municipios de Tunja, Motavita, y Soracá; con una menor incidencia en el municipio de Sora.

3.2.4 Factor de forma ( $K_f$ ).

$$K_f = \frac{A}{Lax^2}$$

$$K_f = \frac{163.54}{24.563^2} = 0,271$$

Este valor del factor de forma se obtuvo del área previamente calculada y de la longitud axial de la cuenca, para el que tomamos la longitud del cauce principal.

Un valor de  $K_f$  por encima de la unidad, denota una gran tendencia a la concentración del escurrimiento y a la generación de crecientes; lo que no sucede en este caso ya que nuestro valor de  $K_f$  está muy por debajo de la unidad.

3.2.5 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius ( $K_c$ )

$$K_c = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$K_c = 0.282 * \frac{95.75}{\sqrt{163.54}}$$

$$K_c = 2.11$$

Este valor de  $K_c$  nos indica que la cuenca de estudio no tiende a concentrar crecientes ya que está bastante alejado de la unidad.

3.2.6 Índice de alargamiento ( $R_a$ )

$$R_a = 1.128 * \frac{\sqrt{A}}{Lax}$$

$$R_a = 1.128 * \frac{\sqrt{163.54}}{24.563}$$

$$R_a = 0.587$$

Se puede tener una clasificación de la cuenca según el índice de alargamiento de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 34. Clasificación del terreno según Ra

0.8	TERRENO PLANO
0.7	TERRENO EN TRANSICIÓN
0.6	TERRENO MONTAÑOSO

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla se puede concluir que gran parte de la cuenca de estudio se encuentra en un terreno montañoso.

### 3.2.7 Índice asimétrico.

$$Ias = \frac{A_{mayor}}{A_{menor}}$$

$$Ias = \frac{118.261 \text{ Km}^2}{45.121 \text{ Km}^2}$$

$$Ias = 2.620$$

Este valor de 2.620 para el índice de alargamiento refleja que el cauce principal se encuentra bastante cargado a una de las vertientes como se puede observar en el Mapa No. 10.

### 3.2.8 Relación de circularidad (Rc)

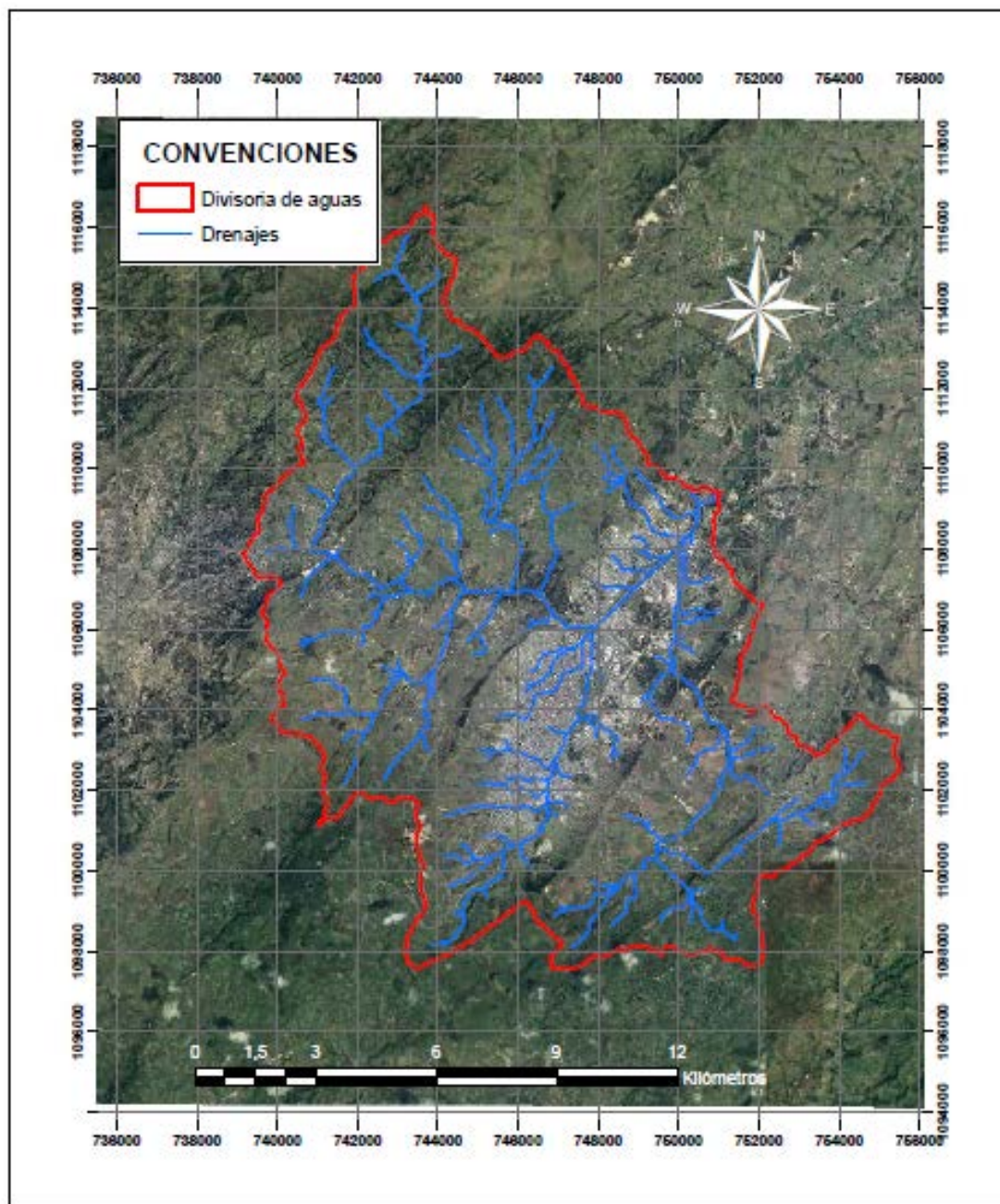
$$Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$$

$$Rc = \frac{4\pi(163.54\text{Km}^2)}{(95.75\text{Km}^2)^2}$$

$$Rc = 0.224$$

Este valor de relación de circularidad Rc nos indica que la cuenca en estudio está muy lejos de tener una forma circular y tiende a ser más lobulada.

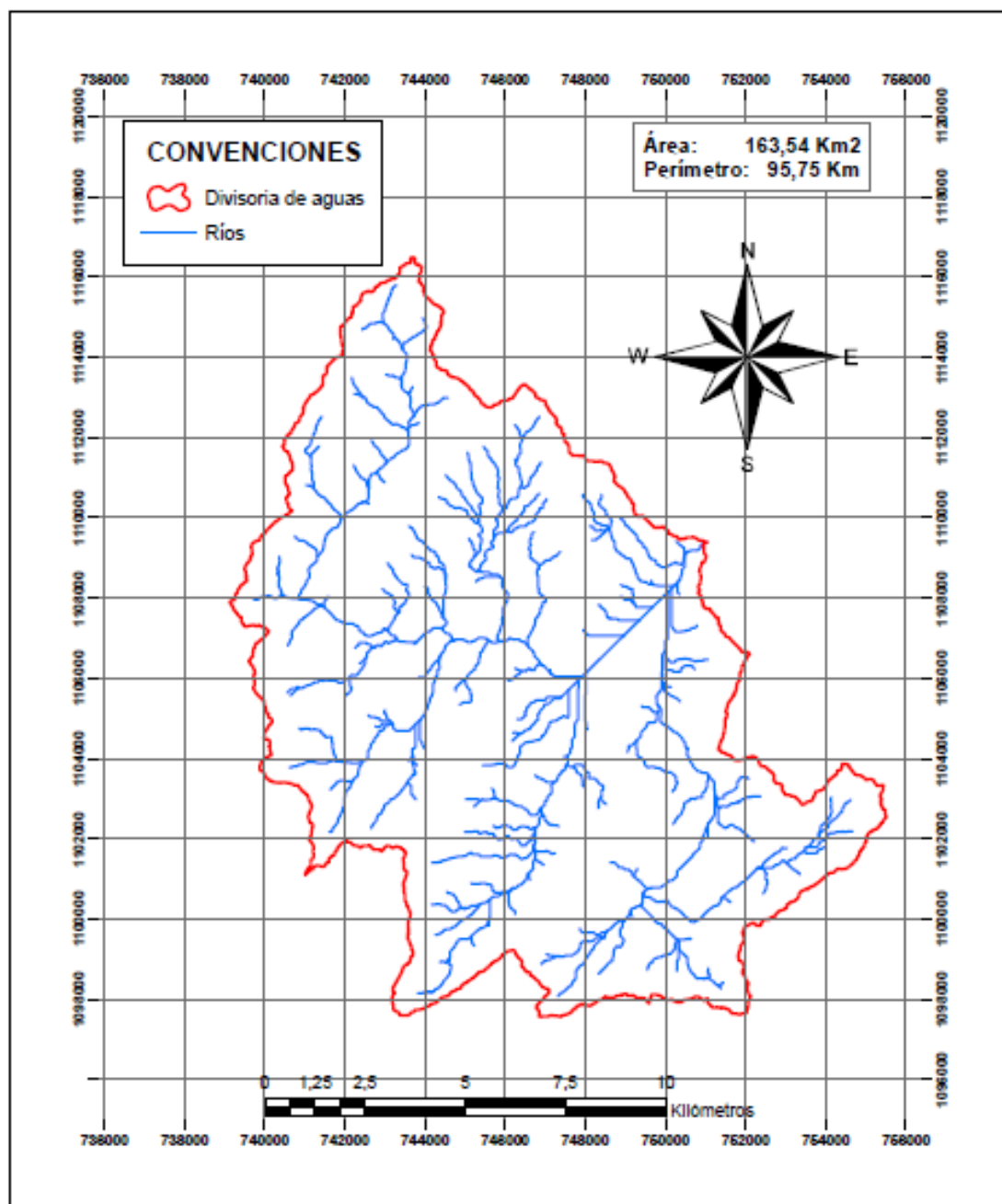
Mapa 6. Delimitación de la cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.



Fuente: Elaboración propia

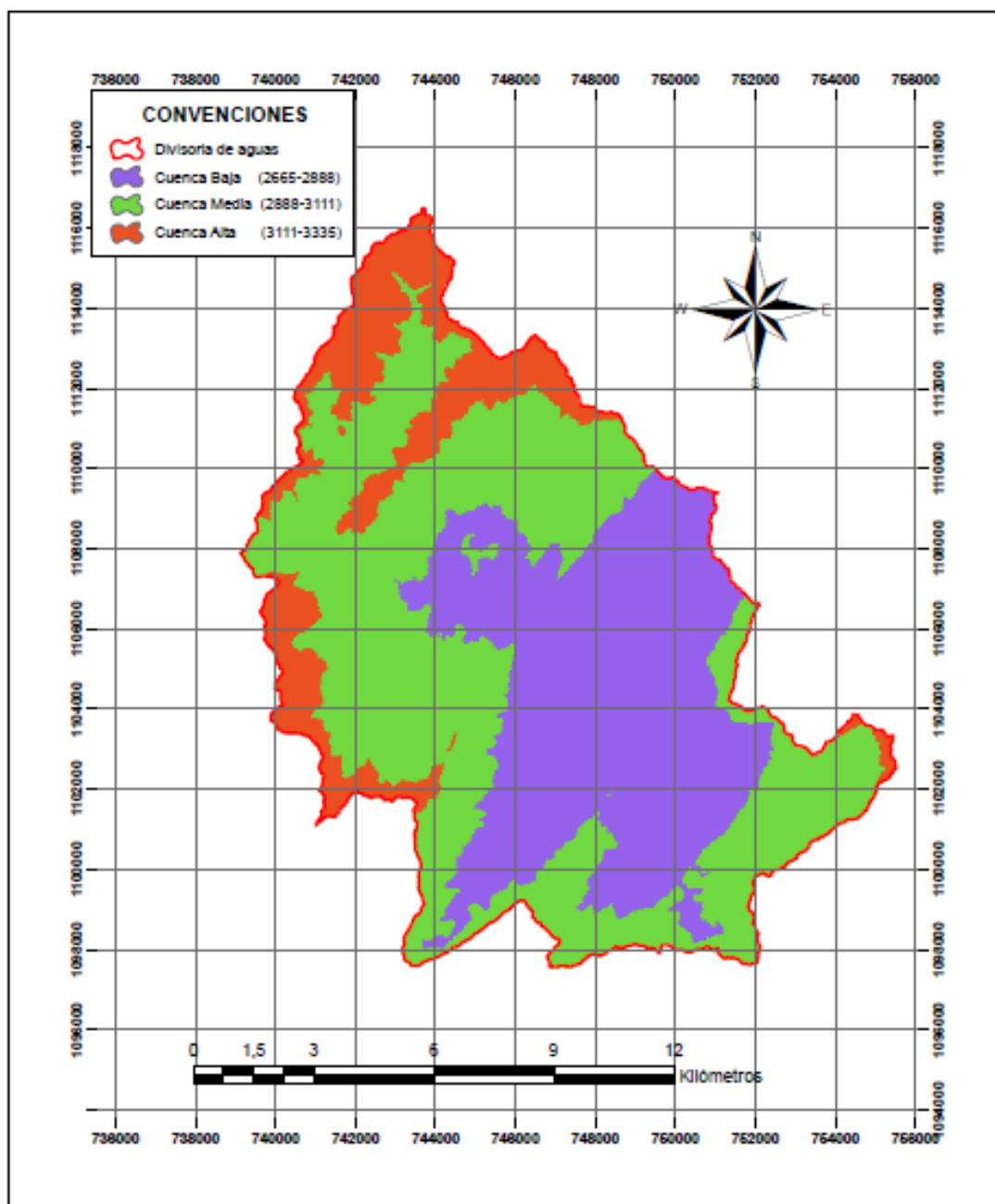


Mapa 7. Área y perímetro cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.



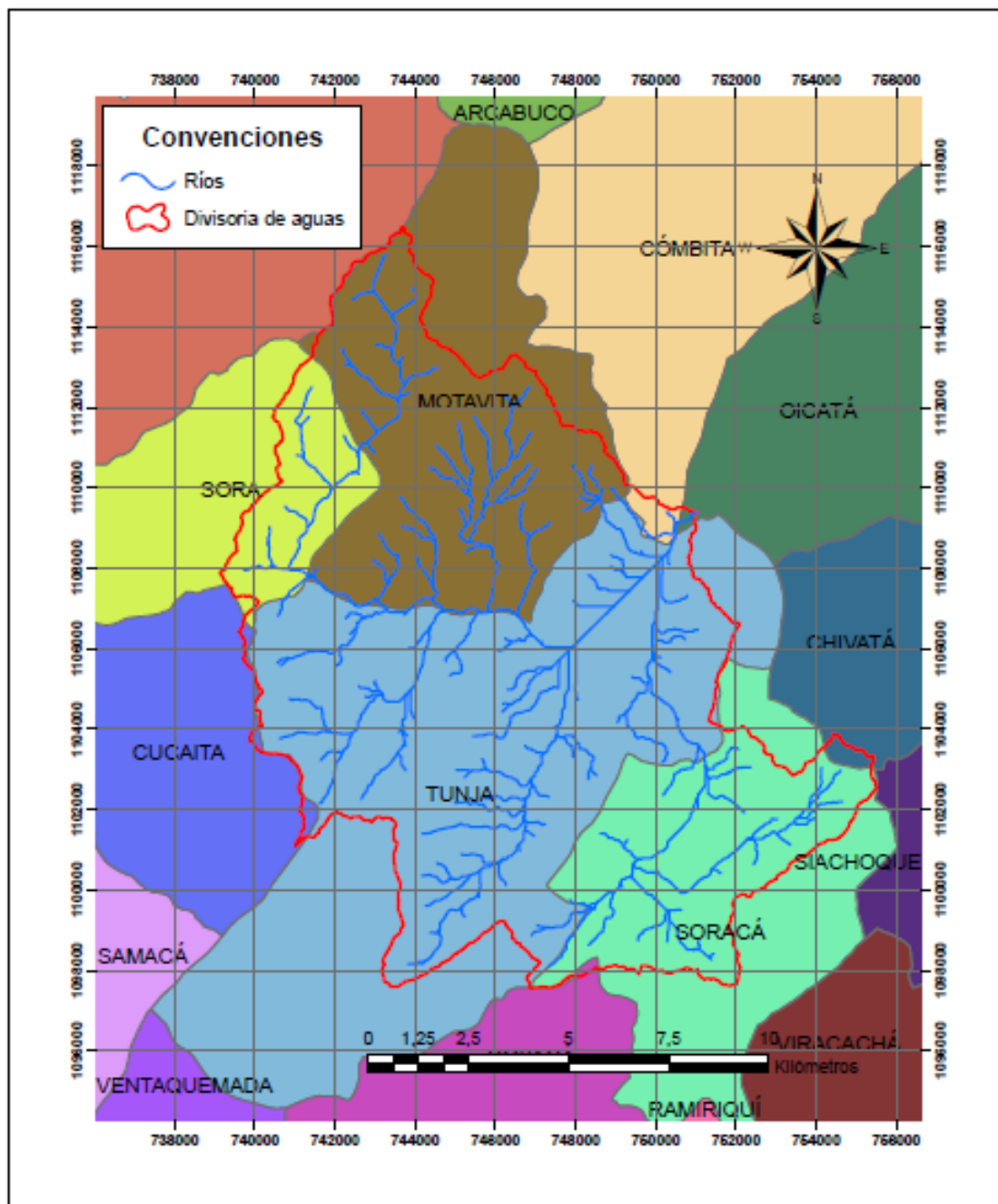
Fuente: Elaboración propia

Mapa 8. Cuenca alta, media y baja de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.



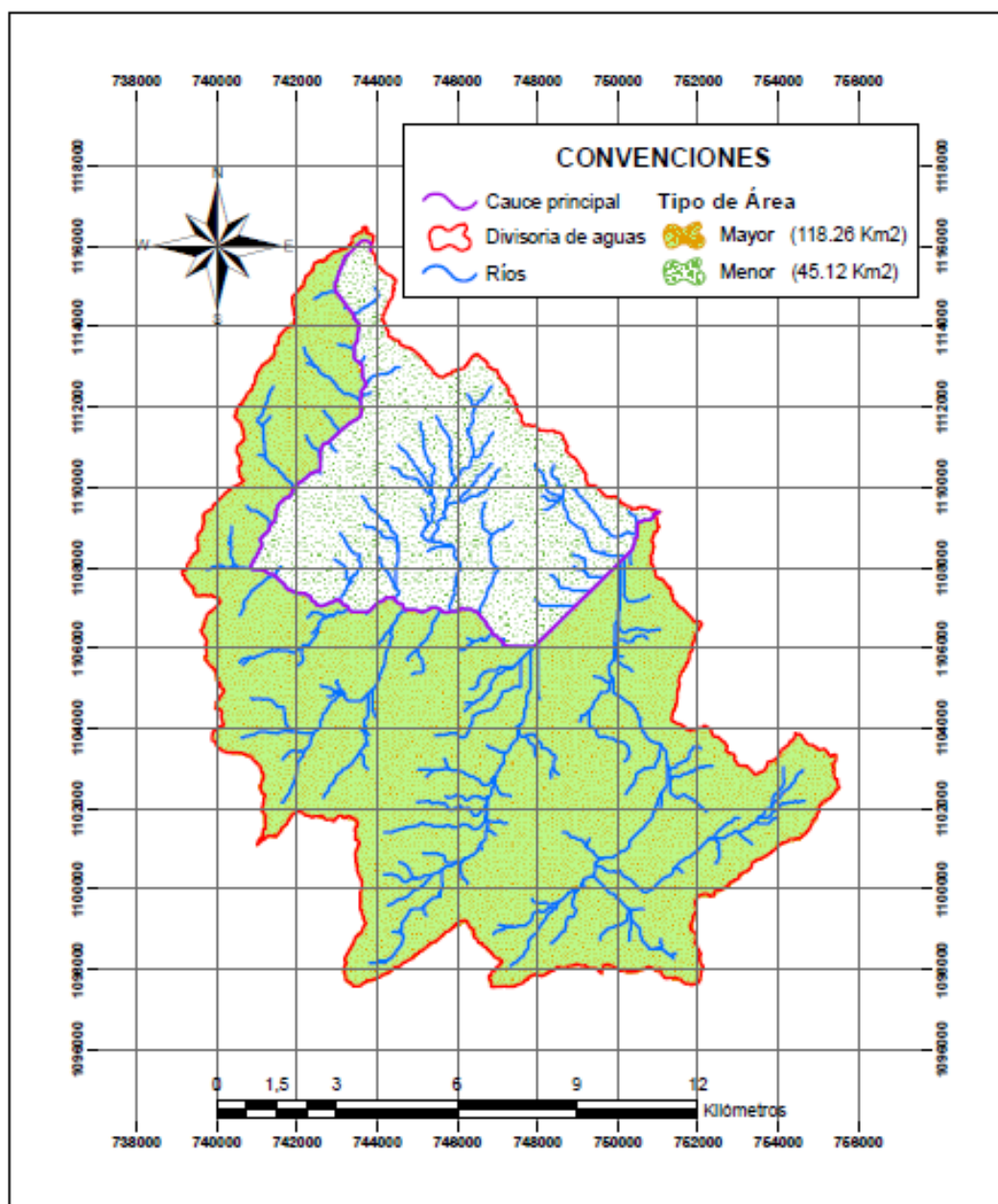
Fuente: Elaboración propia

Mapa 9. Orientación y posición de la cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.



Fuente: Elaboración propia

Mapa 10. Índice asimétrico cuenca de los ríos Jordán, La Vega y Chulo.



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.9 Extensión media de la esorrentía superficial

$$i = \frac{A}{4L}$$

$$i = \frac{163.54km^2}{4(48.28Km)}$$

$$i = 0.84Km$$

Este valor indica la distancia promedio que tiene que recorrer una gota de lluvia que caiga en cualquier parte de la cuenca hidrográfica, para llegar a la corriente de agua más cercana en caso de que la esorrentía se diese en línea recta.

### 3.2.10 Relieve de la cuenca.

A continuación encontraremos una descripción de la cuenca en estudio relacionada con sus parámetros altimétricos como: área acumulada, elevación media de la cuenca, elevación mediana, mapa de pendientes, entre otros.

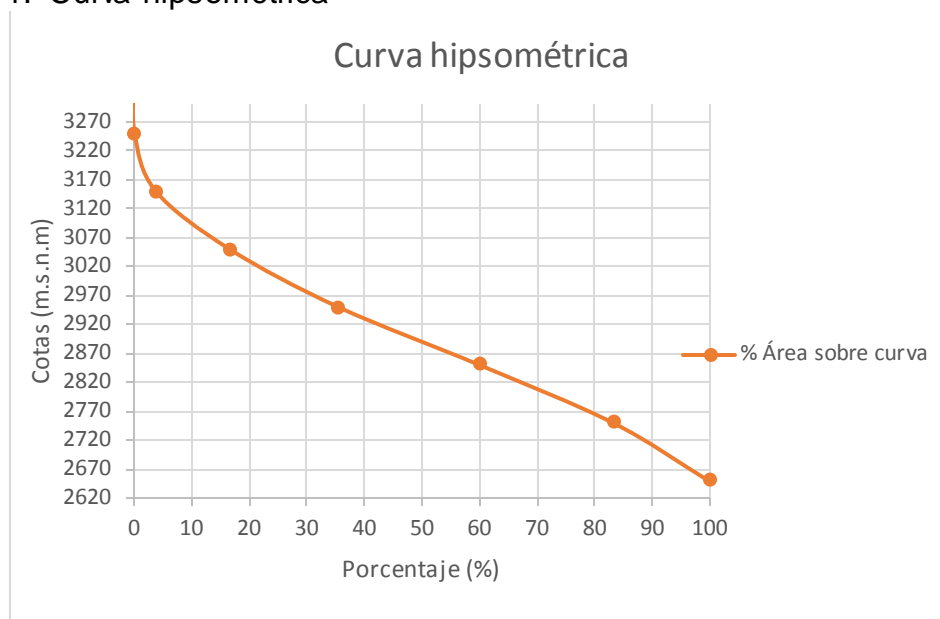
3.2.10.1 Curva hipsométrica. Se construyó a partir de curvas de nivel con una diferencia de elevación de cien metros entre ellas (ver siguiente Tabla) y la correspondiente Gráfica 1.

Tabla 35. Curvas de nivel y porcentaje de área acumulada

Intervalo	Valor	Área (km2)	%	Área acumulada bajo la curva (Km²)	%	Área acumulada sobre la curva (Km²)	%
				0		163,54	100,00
2600-2700	2650	0,08	0,0496	0,08	0,050	163,46	99,95
2700-2800	2750	27,23	16,6510	27,31	16,701	136,23	83,29
2800-2900	2850	38,02	23,2512	65,34	39,952	98,20	60,04
2900-3000	2950	40,18	24,5691	105,52	64,521	58,02	35,47
3000-3100	3050	30,92	18,9052	136,43	83,426	27,10	16,57
3100-3200	3150	20,96	12,8180	157,40	96,244	6,14	3,756
3200-3300	3250	5,97	3,6514	163,37	99,896	0,17	0,104
3300-3400	3350	0,17	0,1045	163,54	100,000	0,00	0,000

Fuente: Elaboración propia

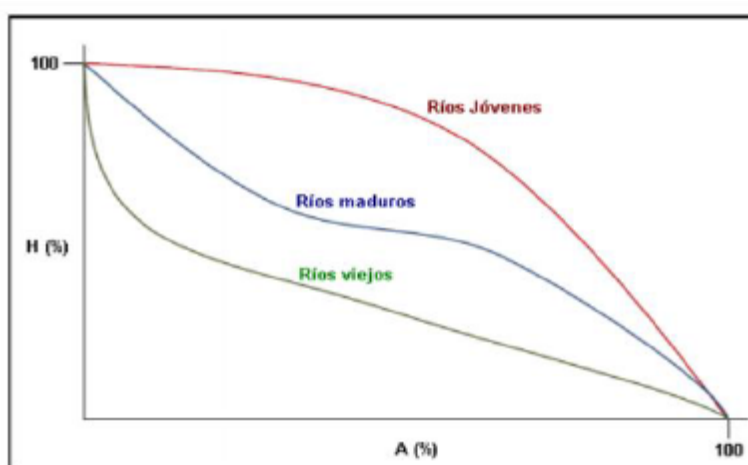
Gráfica 1. Curva hipsométrica



Fuente: Los autores

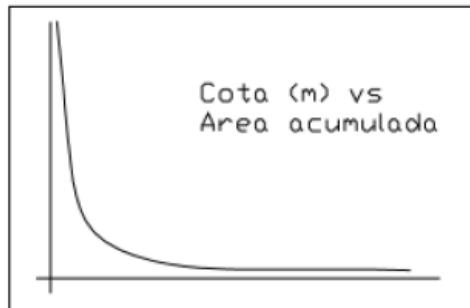
Según las gráficas 2 y 3 se puede concluir que se trata de un río bastante maduro tendiendo a viejo, de altas montañas que posee una distribución de masa estable en gran parte de su área, lo que indica caudales muy estables en la parte baja y media de la cuenca.

Gráfica 2. Edad del río según su curva hipsométrica.

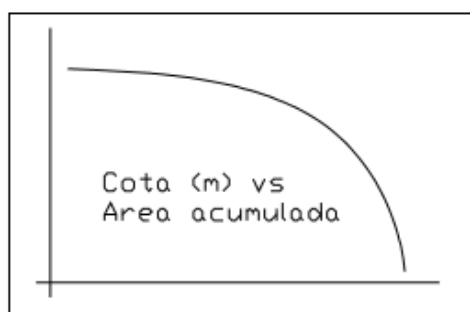


Fuente: MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería 1995. 359p.

Gráfica 3. Altas montañas y valles extenso



Gráfica 4. Altas planicies y valles profundos



Fuente: MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería 1995. 359p.

3.2.10.2 Elevación media y mediana por tratamiento estadístico con software ArcGIS. Se realizó un análisis estadístico del Modelo Digital de Elevación (DEM) de donde se pudieron extraer la elevación media de 2947.25 m.s.n.m y la elevación mediana con un valor de 2939 m.s.n.m como se observa en la siguiente figura:

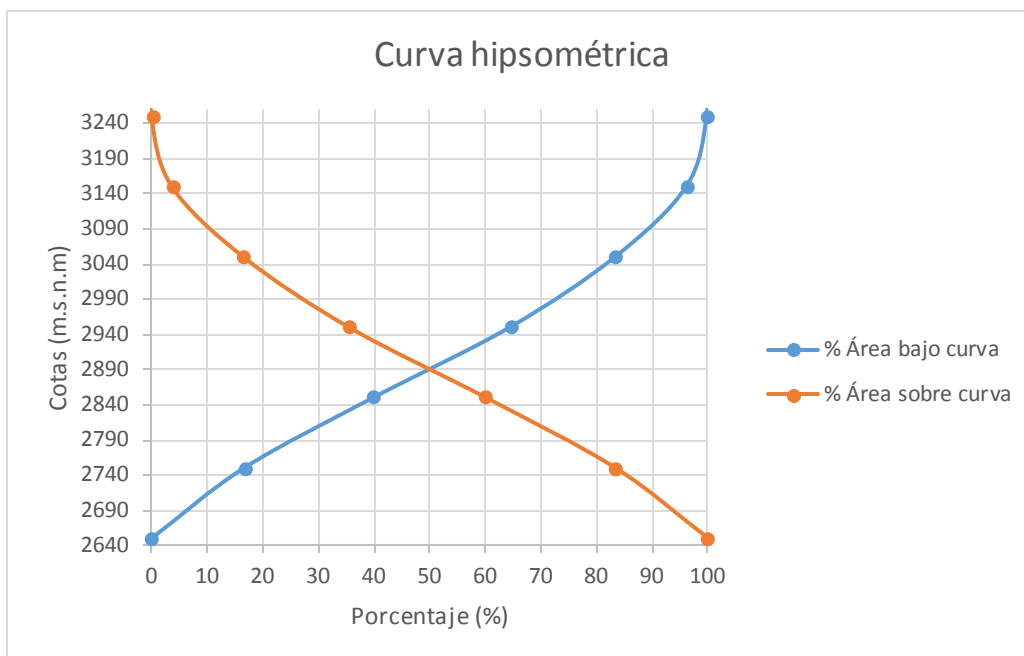
Figura 4. Elevación media y mediana.

Table													
Elevación_media													
Rowid	HYDROID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1	397	104664	163538906,25	2665	3335	670	2947,254622	140,439237	3084741103	668	2712	2666	2939

Fuente: Los autores

3.2.10.3 Elevación mediana de la cuenca según la curva hipsométrica. De la Tabla No. 34, también se puede graficar el porcentaje del área bajo la curva, que al interceptarse con la gráfica de porcentaje de área sobre la curva nos puede dar un estimado la elevación mediana de la cuenca así:

Gráfica 5. Elevación media según la curva hipsométrica.



Fuente: Los autores.

De donde se puede apreciar claramente una elevación mediana por este método de 2890 m.s.n.m.

3.2.10.4 Determinación de la elevación media de la cuenca por el método de área – elevación. Se obtuvieron curvas de nivel cada 50 m a partir del modelo digital de elevación, y luego el área entre cada una de estas curvas, para poder así llegar a obtener los resultados mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 36. Elevación media; método de área – elevación.

Curvas de Nivel	Elevación promedio (ei)	Área en Km2 (Ai)	Ai * ei
2650-2700	2675	0,08	206,11
2700-2750	2725	15,35	41837,23
2750-2800	2775	11,88	32960,25
2800-2850	2825	17,96	50726,86
2850-2900	2875	20,07	57696,32
2900-2950	2925	22,14	64753,45
2950-3000	2975	18,04	53673,49
3000-3050	3025	15,76	47668,72
3050-3100	3075	15,16	46611,35
3100-3150	3125	12,55	39214,03
3150-3200	3175	8,41	26711,57



Tabla 35. (Continuación)

Curvas de Nivel	Elevación promedio (ei)	Área en Km2 (Ai)	Ai * ei
3200-3250	3225	4,50	14514,9763
3250-3300	3275	1,47	4815,64543
3300-3350	3325	0,17	568,202949
Sumatoria			481958,256

Fuente: Elaboración propia.

Y de donde se pudo obtener la elevación media de la cuenca según la siguiente expresión así:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * e_i}{A_t}$$

$$E_m = \frac{481958,256 \text{ Km}^2 * m. s. n. m}{163,54 \text{ Km}^2}$$

$$E_m = 2947.03 \text{ m. s. n. m}$$

3.2.11 Coeficiente de masividad (Km). Tomando el valor de elevación media de la cuenca, hallado por el método de área – elevación, y el área total de la cuenca se llega al valor de Km según la siguiente expresión:

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\frac{\text{Área de la cuenca Km}^2}{2947 \text{ m. s. n. m}}}$$

$$K_m = \frac{2947 \text{ m. s. n. m}}{163,54 \text{ Km}^2}$$

$$K_m = 18.02$$

Este valor de coeficiente de masividad (Km) nos indica que se trata de una cuenca muy montañosa según la siguiente tabla:

Tabla 37. Clases de valores de masividad.

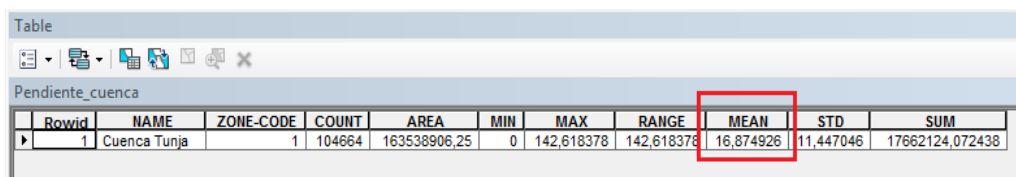
Rangos de Km	Clases de masividad
0-35	Muy Montañosa
35-70	Montañosa
70-105	Moderadamente Montañosa

Fuente: Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancitaro, Instituto Nacional de Ecología, Estudio contratado a: José de Jesús Alfonso Fuentes Junco, México, Julio 2004. Online.

[http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria\\_pico\\_tancitaro.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf)

3.2.12 Cálculo de la pendiente media mediante software. Mediante el tratamiento del Modelo Digital de Elevación, haciendo un análisis estadístico con ayuda del software Arc Gis, se pudo obtener un valor de pendiente media de 16,87% como se observa en la siguiente figura extraída del software.

Figura 5. Pendiente media calculada con el software ArcGis.



Rowid	NAME	ZONE-CODE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	Cuenca Tunja	1	104664	163538906,25	0	142,618378	142,618378	16,874926	11,447046	17662124,072438

Fuente: Elaboración propia.

De este tratamiento estadístico se obtuvo un mapa de pendientes como se puede observar en el Mapa No. 11.

3.2.13 Determinación de la pendiente por el método de Alvord. Para la determinación de la pendiente por este método fue necesario obtener curvas de nivel con 50 m de diferencia entre cada una, hallar la longitud en kilómetros de cada una de ellas como se muestra en la Tabla No. 38, y con el área de la cuenca. Reemplazando en la siguiente expresión tenemos:

$$S_m = \frac{DL}{A}$$

$$S_m = \frac{0.050Km * 568.79Km}{163.54Km^2}$$

$$S_m = 0.174 * 100\% = 17\%$$

Este valor de la pendiente media es razonablemente bajo, lo que nos indica que la cuenca en estudio no es propensa a la concentración de crecientes.

Tabla 38. Curvas de nivel cada 50 m y su longitud en Km.

Curvas de Nivel (m.s.n.m)	Longitud (Km)
2700	0,87
2750	38,28
2800	36,09
2850	62,02
2900	71,16
2950	77,70

Tabla 38. (Continuación)

Curvas de Nivel (m.s.n.m)	Longitud (Km)
3000	58,90
3050	65,38
3100	63,81
3150	50,54
3200	31,02
3250	11,29
3300	1,72
Sumatoria Longitud (Km)	568,79

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.14 Morfología de drenaje.

En el siguiente capítulo se realizará una caracterización de los drenajes de la cuenca, mostrando parámetros como: longitud del cauce principal, perfil del cauce principal, número de orden, relación de bifurcación, sinuosidad, entre otros.

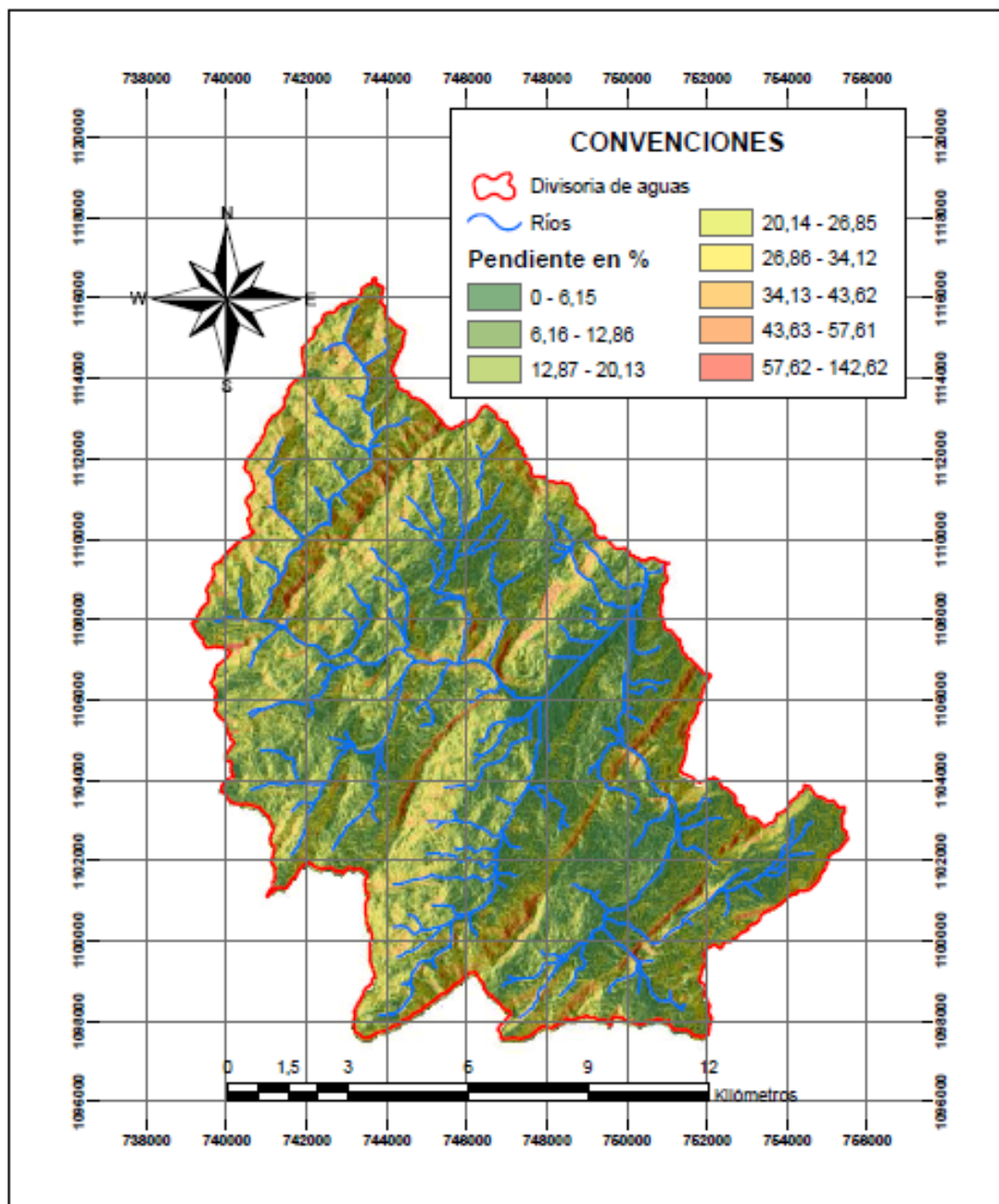
3.2.14.1 Cálculo de la pendiente por el método de valores extremos. Tomando los valores para la cota máxima de 3335 m.s.n.m, la cota mínima como 2665 m.s.n.m y la longitud del cauce principal 24563 m, y aplicando la siguiente expresión tenemos:

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

$$S = \frac{3335 \text{ m.s.n.m} - 2665 \text{ m.s.n.m}}{24563 \text{ m}}$$

$$S = 0.027 * 100\% = 2.73\%$$

Mapa 11. Mapa de pendientes.



Fuente: Los Autores.

3.2.14.2 Cálculo de la pendiente del cauce principal por el método de Taylor-Schwartz. Para la implementación de este método se dividió la longitud total del cauce principal en diez (10) tramos de igual longitud (2456.3 metros), determinando el valor de su elevación en su cota más baja y en su cota máxima para cada uno de ellos como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 39. Tramos del cauce principal y sus respectivas pendientes.

Número de tramos	Longitud (m)	Cota menor (m)	Cota mayor (m)	Pendiente m/m (SI)	1/(SI)^1/2
10	2456,3	2665	2712	0,019	7,23
	2456,3	2712	2713	0,000	49,56
	2456,3	2713	2749	0,015	8,26
	2456,3	2749	2857	0,044	4,77
	2456,3	2857	2941	0,034	5,41
	2456,3	2941	2991	0,020	7,01
	2456,3	2991	3011	0,008	11,08
	2456,3	3011	3034	0,009	10,33
	2456,3	3034	3095	0,025	6,35
	2456,3	3095	3335	0,098	3,20
Sumatoria					113,1972349

Fuente: Los autores.

Aplicando la siguiente expresión tenemos:

$$S_m = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

$$S_m = \left[ \frac{10}{113,1972} \right]^2$$

$$S_m = 0.0078 * 100\% = 0.78\%$$

3.2.14.3 Cálculo de la pendiente por el método de compensación de áreas. Habiendo realizado la compensación de áreas con ayuda del software AutoCAD se obtuvieron los valores para la cota máxima de 3149 m.s.n.m, la cota mínima como 2665 m.s.n.m y la longitud del cauce principal 24563 m, y aplicando la siguiente expresión tenemos:

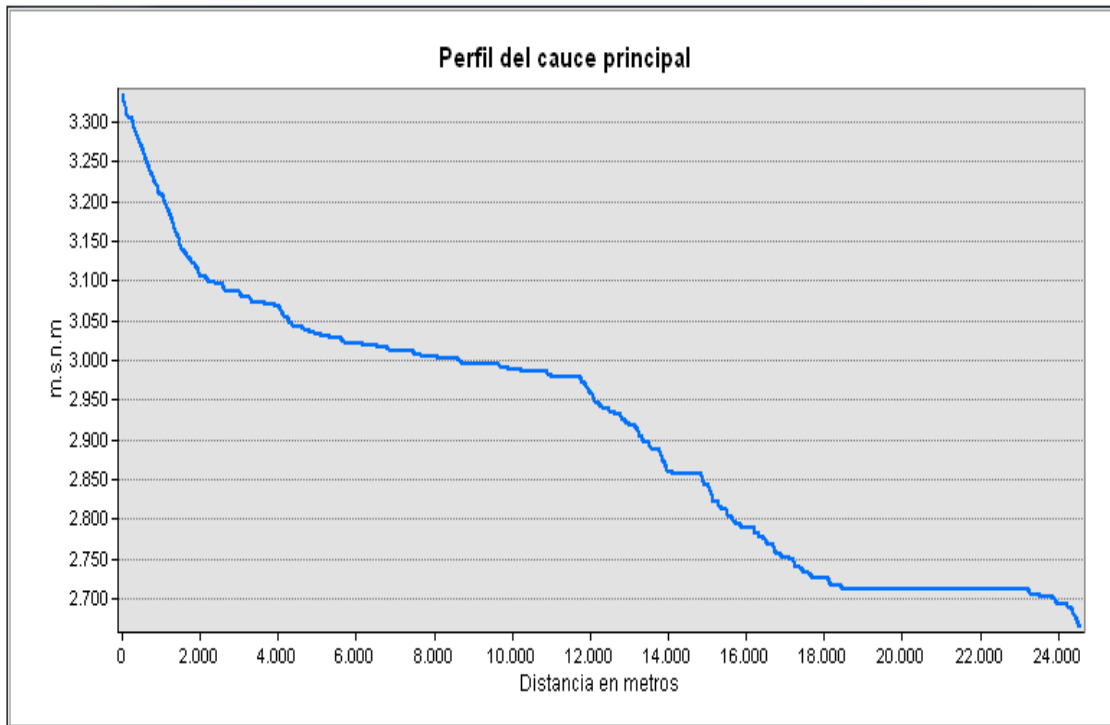
$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

$$S = \frac{3149 \text{ m.s.n.m} - 2665 \text{ m.s.n.m}}{24563 \text{ m}}$$

$$S = 0.0197 * 100\% = 1.97\%$$

3.2.14.4 Perfil del cauce principal. El perfil del cauce principal se obtuvo mediante el tratamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM) con el software Arc Gis. Del que se obtuvo la siguiente gráfica:

Grafica 6. Perfil del cauce principal.

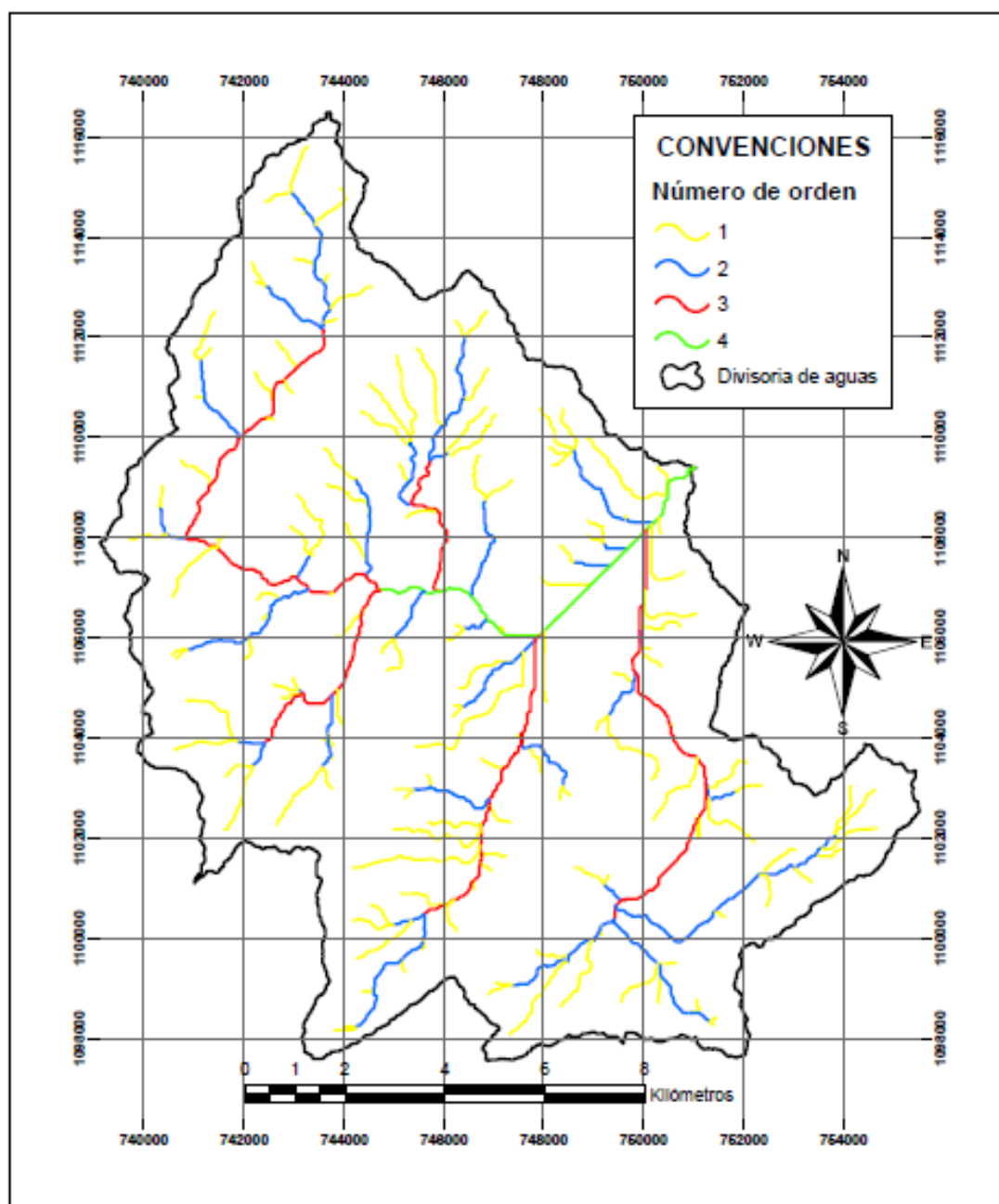


Fuente: Elaboración propia.

3.2.15 Análisis de la red de drenaje. Se pudo determinar que el orden del cauce principal es cuatro (4) por medio del software Arc Gis, mediante el tratamiento hecho al Modelo Digital de Elevación (DEM) como se puede observar en la mapa No. 12.

3.2.16 Densidad de drenaje. Se pudieron determinar el número total de las corrientes y su longitud con ayuda del software Arc Gis, como se muestra en la tabla 40.

Mapa 12. Numero de orden.



Fuente: Los autores.

Tabla 40. Longitudes de los ríos de la cuenca.

NÚMERO DE ORDEN	NÚMERO DE RIOS	LONGITUD EN Km
1	151	113,40
2	82	53,29
3	49	35,04
4	17	8,62
SUMATORIA	299	210,35

Fuente: Elaboración propia.

Según la siguiente expresión tenemos:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

$$D_d = \frac{210.35 \text{ Km}}{163.54 \text{ Km}^2} = 1.29 \text{ Km/Km}^2$$

Debido a que este valor de  $D_d > 0.5 \text{ Km/Km}^2$  podemos considerar que nuestra cuenca es una cuenca con densidad de drenaje baja como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 41. Clases de densidad de drenaje.

Rangos de densidad	Clase
0.1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

Fuente: Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancitaro, Instituto Nacional de Ecología, Estudio contratado a: José de Jesús Alfonso Fuentes Junco, México, Julio 2004. Online. [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria\\_pico\\_tancitaro.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf)

3.2.17 Coeficiente de torrencialidad (Ct). Se calculó el coeficiente de torrencialidad según la siguiente expresión.

$$C_t = \frac{\# \text{ cauces orden } 1}{A}$$

$$C_t = \frac{151}{163.54 \text{ Km}^2} = 0.92$$



Se puede observar que la cuenca de estudio presenta un coeficiente de torrencialidad considerable. Esto indica que el agua recorre poca distancia, antes de llegar a los cauces; causando grandes velocidades de descarga.

3.2.18 Sinuosidad. Para el cálculo de este parámetro fue necesario dibujar una curva suavizada a lo largo del cauce principal con la ayuda del software Arc Gis, del cual se extrajo su longitud y mapa como se muestra en el mapa No. 13.

Calculamos la sinuosidad según la siguiente expresión:

$$S = \frac{L}{L_t}$$

$$S = \frac{24.563 Km}{20.710 Km} = 1.19$$

Un valor de sinuosidad menor a 1.25 indica que es un cauce con poca sinuosidad que tiende a permanecer recto con muy pocas curvas.

3.2.19 Relación de bifurcación. Calculamos la relación de bifurcación según la siguiente expresión como se puede observar en la tabla No. 42.

$$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

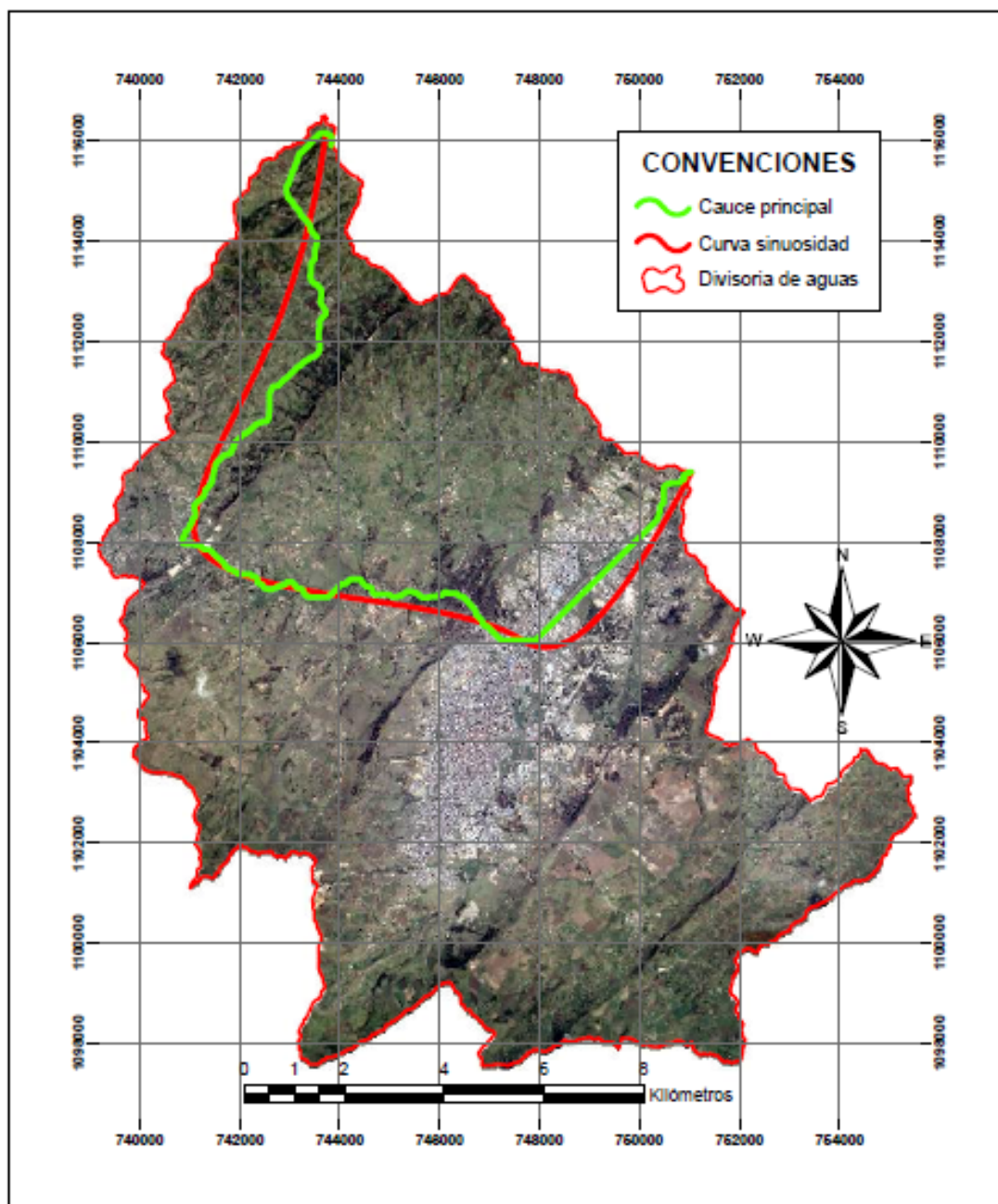
Tabla 42. Relación de bifurcación.

NÚMERO DE ORDEN	NÚMERO DE SEGMENTOS	RELACIÓN DE BIFURCACIÓN
1	151	1,84
2	82	1,67
3	49	2,88
4	17	

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores de Rb indican que la cuenca de estudio no es una cuenca madura, que su geología distorsiona el patrón de drenaje, y cuya erosión seguirá actuando y fomentando la formación de nuevos cauces.

Mapa 13. Sinuosidad.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 ANÁLISIS DE RECOMENDACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE CUENCAS URBANAS Y RURALES.

Según las recomendaciones de la OMM para instrumentación hidrometeorológica en cuencas urbanas, se adoptó la división de la ciudad de Tunja en zonas climatológicas urbanas; en donde se recomienda la instalación de una estación hidrometeorológica para cada una de ellas, también se tendrá en cuenta la utilización de mástiles para la instalación de las mismas según recomendaciones de la OMM.

En cuanto a las recomendaciones para zonas rurales, se tendrá en cuenta un valor de densidad de: una (1) estación por cada diez (10) kilómetros cuadrados según recomendaciones de la OMM. En cuanto a la medición de caudales en los principales afluentes de la cuenca en estudio, se tendrán en cuenta la recomendación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) vistas en el capítulo 1.4.2 de este libro en los requerimientos técnicos de la sección de aforo.

### 3.4 ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.

En este proyecto encontramos dos zonas claramente definidas que permiten diferenciar el tipo de instrumentación a utilizar: la primera, la zona urbana, la cual estará limitada por los espacios y por las edificaciones a lo largo del perímetro urbano con posibilidad de influenciar la calidad de la toma de datos o registros hidroclimatológicos; como una segunda tenemos la zona rural, la cual está menos limitada en cuanto a espacio, y la influencia por las edificaciones es mínima debido a que estas se encuentran más retiradas unas de otras y la altura de estas es considerablemente menor.

Como se indicó anteriormente en algunos de los numerales de este documento, existen estaciones meteorológicas compactas que pueden medir hasta diez (10) variables, estas estaciones ocupan menos espacio para su implantación ya que su tamaño lo permite, su instalación es sencilla, al igual que su manejo. Por otra parte, existen los sensores meteorológicos los cuales miden cada una de las variables meteorológicas por separado, pero para estos es necesario el uso de aparatos electrónicos para su posterior procesamiento y registro. Los sensores para cada variable requieren de mucho más espacio y una correcta ubicación dentro de la configuración de la estación.

Para el caso de las mediciones hidrométricas se pueden encontrar las miras o reglas de nivel y los sensores de radar, estos últimos pueden medir el flujo y nivel de un cuerpo de agua, lo cual los hace más útiles, ya que cuando se utilizan miras se hace una medida indirecta para calcular el caudal, la cual depende de la

sección del canal del río siendo esta cambiante con el tiempo, lo que hace de esto un cálculo poco preciso.

La toma de datos, registro y almacenamiento en cuanto a la hidrometría con el uso de miras y reglas se hace tedioso debido a que hace obligatoria la visita al sitio ya sea para obtener los datos, puede ser en forma de gráfico o de datos tabulados dependiendo del sensor utilizado. El utilizar el sensor hidrométrico por radar evitaría este tipo de situación, ya que algunos vienen con el sistema de comunicación incluido para tener los datos en tiempo real, o también dan la posibilidad de agregarle accesorios que se encargan de estas labores.

De los proveedores consultados, algunos ofrecen productos con muy buenas características en cuanto a la precisión de sus medidas, así como el cumplimiento de los requerimientos establecidos por las diferentes entidades para asegurar la homogeneidad de los datos. En cuanto a la toma de datos, cada aparato posee su memoria interna con una capacidad de almacenamiento de hasta 500.000 datos, los cuales se pueden descargar por medio de una USB en el sitio del emplazamiento o se puede tener la alternativa de utilizar la red de Ethernet si está disponible o la red 3G, en caso de que la anterior no esté disponible, para la transmisión y procesamiento de datos en tiempo real evitando la visita al sitio de emplazamiento para las estaciones que se encuentran en zonas rurales y están muy retirados. En caso de que se requieran los registros de una variable en específico, los proveedores tienen la opción de los datalogger, los cuales son unos accesorios electrónicos que ayudan en la toma y transmisión de datos. En caso de que la estación no mida alguna variable y si esta se necesita en estudios posteriores, este sensor se puede agregar ya que las estaciones compactas disponen de puertos adicionales en caso de que esto ocurra o que alguno de los sensores internos se dañe.

Estos equipos en su mayoría funcionan con energía eléctrica, para el caso de las estaciones compactas estas traen su propio sistema de alimentación el cual consiste en un panel solar el cual brinda la energía suficiente para el funcionamiento del equipo durante todo el día. Para el caso de las estaciones armadas con sensores independientes, también se tiene la disponibilidad del uso de paneles solares que pueden alimentar a estos equipos además de la consola central de funcionamiento la cual toma los datos, registra, almacena y transmite.

Estos aparatos pueden configurarse para que tomen las medidas de acuerdo con las necesidades que se tengan, pueden tomar registros cada 2 segundos para las últimas 24 horas, días o meses en el caso de la precipitación.

Los materiales con los que son hechos estos aparatos son de gran resistencia por que los fabricantes no saben en qué tipo de ambiente estarán emplazados, pueden resistir ambiente bajo cero hasta temperaturas altas, además de tener

componentes que ayudan a disminuir el error en la toma del registro como es el caso de la radiación solar.

Todos los fabricantes ofrecen junto a los aparatos un software para la visualización de los datos en un dispositivo móvil, ya sea por medio de internet o dentro del rango de alcance de transmisión de estos los cuales varían de 300 metros hasta 1 kilómetro en línea recta, este último se puede hacer sin necesidad de conexión de Ethernet o red telefónica ya que utilizan el bluetooth como el de los celulares para esto. También se puede encontrar adicional un dispositivo de visualización de datos el cual se conecta a la estación.

### 3.5 SELECCIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.

En Colombia existen varios proveedores que se pueden encontrar explorando la red mundial de información con un poco de detalle, teniendo esto en cuenta se enviaron solicitudes de cotización para la compra de estaciones meteorológicas compactas o estaciones meteorológicas conformadas por distintos sensores y datalogger. Las especificaciones técnicas se hicieron con base el anexo de especificaciones de estaciones del IDEAM<sup>55</sup> de un proyecto realizado en la ciudad de Duitama.

Para la selección de la más apropiada instrumentación de acuerdo con las características especificadas por las diferentes entidades e instituciones, se dio prioridad a los proveedores nacionales, los cuales aproximadamente son cinco (5), los más importantes, en su mayoría ofrecen los mismos productos con el cumplimiento especificaciones mínimas y con una buena precisión en sus medidas, precios similares en las estaciones y cuya variación depende de los accesorios adicionales que sean incluidos.

Los proveedores se encontraron a través de la red mundial de comunicaciones, por ejemplo, en el portal web de mercado libre ofrecen estaciones compactas marca Davis la cual es una de las más comunes, otros portales que ofrecen este tipo de instrumentación son: Equipos y Laboratorios de Colombia, M&M Instrumentos Técnicos, Agroelectrónica, Durespo, Grupo Alce, Topoequipos, Meteagro, Insak, AyV Ingeniería.

La marca más ofrecida es la Davis Instruments, la mayoría de los proveedores la ofrecen en tres paquetes los cuales varían en la calidad del equipo y en la catalogación que le dan como profesional o aficionado, si este incluye los sistemas

---

<sup>55</sup> IDEAM. Adquisición, instalación y puesta en funcionamiento de siete (7) estación hidrometeorológicas automática en la jurisdicción del AO – 06 con sede en Duitama – área de influencia Lago de Tota, de acuerdo con los requerimientos técnicos establecidos por el IDEAM. Bogotá D.C, Octubre 2016. 38p

de comunicación, almacenamiento y precisión. Para esta marca de estaciones no es necesario la compra por aparte de la estructura de montaje ya sea el trípode o mástil, además de traer soportes extras en caso de colocársele un accesorio adicional. Antes de hacer el emplazamiento del equipo se deben cumplir con unas adecuaciones del terreno y de ubicación dadas por ellos, estas últimas son las mismas de la OMM, a manera de recomendaciones de las cuales se habló anteriormente en este documento. El valor de las estaciones varía si se desea una capacitación en cuanto al manejo y si ellos mismos la instalan. Si se desea de un datalogger o un accesorio adicional, ellos también pueden proveerlo.

El proveedor Durespo es uno de los dos representantes del fabricante Campbell Scientific para Colombia, ofrecen cuatro (4) posibilidades de estaciones con nivel profesional que miden las variables básicas (temperatura, precipitación, velocidad del viento, dirección del viento, etc.). Estas estaciones incluyen sistemas de alimentación por medio de batería solar, datalogger, sistemas de comunicación y de montaje.

Imagen 10. Ejemplo estaciones Campbell Scientific.



Fuente: [www.campbellscientific.com](http://www.campbellscientific.com)

Meteagro ofrece dos tipos de estaciones, la versión básica y la versión pro, sus características son muy similares a las nombradas anteriormente, no se observa la marca de los aparatos solo da unas referencias, lo particular de la versión pro es la mayor precisión en la toma de datos y que esta versión incluye el sistema de almacenamiento y comunicación. A diferencia de las anteriores esta marca no incluye el soporte (trípode o mástil) dentro del sitio de emplazamiento, lo cual implicaría un costo extra.

Imagen 11. Ejemplo estaciones ofrecidas por Meteagro



Fuente: [www.meteagro.com](http://www.meteagro.com)

El grupo Alce ofrece estaciones meteorológicas de la marca Davis mencionada con anterioridad y las marcas Whatchdog y RainWise, diferenciándose en el precio ya que poseen características muy similares, estas estaciones también incluyen el mástil o trípode de montaje.

Imagen 12. Ejemplo estaciones Whatchdog y Rainswise.



Fuente: [www.grupoalce.com](http://www.grupoalce.com)

Para las estaciones hidrométricas las opciones se reducen, ya que estos productos no aparecen dentro de los catálogos de los proveedores mencionados, pero el fabricante alemán OTT ofrece una gran variedad de sensores hidrométricos, pero la empresa AyV ingeniería dentro de sus productos muestra estaciones hidrométricas ya instaladas en la ciudad de Manizales, además de varios convenios realizados con el objetivo del monitoreo meteorológico.

Cabe resaltar que las estaciones a especificar para este proyecto estarán dentro de un espacio de aproximadamente 2 m por 2 m, el cual estará cercado para evitar manipulación de agentes externos, contando con una puerta de acceso y la nivelación del piso como lo sugieren los proveedores.

Para una mayor facilidad en el manejo y mantenimiento de los equipos se optó por la alternativa de dejar todas las estaciones homogéneas, además de que algunas de estas empresas ofrecen el montaje en conjunto con la capacitación del personal haciendo de esto un proceso con menos gente y por lo tanto más exacto.

3.5.1 Cotizaciones recibidas. De las solicitudes de cotización enviadas se obtuvieron respuestas positivas por parte de las siguientes empresas: Equipos y Laboratorios de Colombia, Weather Control S.A.S, Agroelectrónica Ingeniería Ltda y la Comercializadora Internacional MyM instrumentos técnicos S.A.S. Los valores que se muestran a continuación no incluyen el IVA, el detalle de la cotización se presentara como anexo

#### 3.5.1.1 Estaciones compactas.

- Estaciones Davis. Para las estaciones Vantage PRO 2 Vue el valor vario dependiendo si el transmisor de datos es por medio de IP o de USB.

Imagen 13. Ejemplo estaciones compactas Vantage.



Fuente: [www.equiposylaboratorio.com](http://www.equiposylaboratorio.com)

La empresa Equipos y Laboratorios S.A.S el valor de instalación en cualquier parte del país tiene un valor de \$1'000.000. Weather Controls S.A.S tiene como valor agregado la garantía por 1 año, envió, instalación, capacitación y asistencia técnica.



Tabla 43. Precios estaciones

Equipo	Equipos y laboratorio S.A.S	Weather Controls S.A.S	C.I M&M Instrumentos Técnicos S.A.S	AGROELECTRONICA INGENIERIA LTDA
Davis Vantage Pro 2	\$4'835.000	\$4'055.000	\$5'974.000	\$7'087.260 y \$6'848.253
Davis Vantage Vue	\$2'700.000	\$2'719.000	\$3'868.800	

Fuente: Elaboración propia

- Otras marcas.

Imagen 14. Ejemplo estación Ambient Weather.



Fuente: Agroelectrónica ingeniería Ltda.

Tabla 44. Comparación precios.

Equipo	Weather Controls S.A.S	AGROELECTRONICA INGENIERIA LTDA
Ambient Weather		\$1'882.000
Oregon Scientific		\$2'750.000
Acuarite	\$974.000	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.2 Estaciones completas. Para las estaciones rurales se contempla la posibilidad de montar estaciones más complejas, debido a que se necesita de un

espacio mayor para su montaje, además de que estas son las de mayor uso por parte del IDEAM como se puede ver en las siguientes imágenes.

Imagen 15. Estación meteorológica IDEAM, ubicada en Paipa.



Fuente: Elaboracion propia

Imagen 16. Estación hidrometeorológica IDEAM sobre el rio Cravo Sur en Labranzagrande.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 17. Estación hidrometeorológica IDEAM sobre el río Cusiana. Vía Sogamoso-Yopal.



Fuente: Elaboración propia.

Para este tipo de estaciones se recibió una respuesta por parte de la empresa Agroelectrónica Ingeniería Ltda., descrita de la siguiente manera:

Tabla 45. Comparación opciones.

Opción 1	Opción 2
Almacenamiento de 4 Gb (5 años)	Almacenamiento de 4 Gb (5 años)
Sensores meteorológicos	Sensores meteorológicos
Alimentación por medio de panel solar.	Alimentación por medio de panel solar.
Estructura de montaje.	Estructura de montaje.
Garantía de dos años, incluye repuestos.	Garantía de dos años, incluye repuestos.
Montaje y capacitación.	Certificados de calibración.
Transmisión de datos en tiempo real por GPRS	Conexión a wifi
Valor: \$10'500.000	Montaje y capacitación. Incluye el enmallado.
	Protección contra descargas
	Mástil de montaje de 10 metros.
	Valor: \$25'000.000

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 18. Opción 1 y 2, propuestas por Agroelectrónica.



Fuente: Cotización recibida por parte de Agroelectrónica Ingeniería Ltda.

3.5.1.3 Sensores hidrométricos. En cuanto a los sensores de nivel no se recibió ninguna respuesta acerca de los precios o si se contaban con estos productos, pero dentro de la red se encontró páginas europeas donde se venden estos sensores los cuales se mostraron en capítulos anteriores y su valor parte desde los 250 euros.

3.5.1.4 Propuesta definitiva. De acuerdo con la información mostrada anteriormente la mejor opción de estación en cuanto a garantías respecto a reputación, mayor uso y precio son las estaciones marca Davis, siguiendo la marca Oregon las cuales tiene gran uso en Estados Unidos. De las dos marcas restantes no se obtuvo más información, pero se toma el precio como referencia para denotar su calidad.

Para las estaciones completas se descarta la opción 2 recibida por la empresa Agroelectrónica ya que tiene valores agregados que no se utilizarán, ya que en el campo las ubicaciones de estas son alejadas de las conexiones wifi además de la diferencia de precio ser muy significativa.

En la tabla que se muestra a continuación se presenta el valor total de la instrumentación de la ciudad de Tunja, los valores mostrados en esta incluyen el servicio de instalación, garantía por 1 año y capacitación del personal. Estos valores no incluyen el costo de la adecuación del sitio de emplazamiento de las estaciones, el cual consiste en un cerramiento en malla eslabonada de 2 metros por 2 metros y una altura de 2 metros.

Tabla 46. Valor instrumentación.

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Estación Davis Vantage Pro 6152	11	\$ 4.055.000	\$ 44.605.000
2	Estación meteorológica automática	11	\$ 10.500.000	\$ 136.500.000
3	Sensor hidrométrico	4	\$ 860.000	\$ 3.440.000
			VALOR PARCIAL	\$ 184.545.000
			IVA 19%	\$ 35.063.550
			VALOR TOTAL	\$ 219.608.550

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6 PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA RED DE INSTRUMENTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS JORDÁN, LA VEGA Y CHULO.

En el presente capítulo se identificarán el número de estaciones hidrometeorológicas, tanto rurales como urbanas, su ubicación según recomendaciones internacionales y el análisis geoestadístico. También la metodología utilizada para definir su ubicación.

3.6.1 Identificación de zonas urbanas para la ubicación de instrumentación meteorológica. Según recomendaciones de la OMM se dividió el casco urbano de la ciudad de Tunja en Zonas Climatológicas Urbanas como se observa en el mapa No 14.

Se puede apreciar que se definieron once (11) regiones con cinco (5) tipos de Zonas Climatológicas Urbanas (ZCU) distintas según la clasificación propuesta por la OMM.

A las zonas climatológicas urbanas definidas se les determinó su respectivo centroide de área, a excepción de la zona ubicada en la UPTC, cuyo centroide se desplazó a las coordenadas de la estación climatológica existente ubicada en esta área.

La clasificación de las Zonas Climatológicas Urbanas para la ciudad de Tunja quedó de la siguiente manera.

- Un (1) polígono con tipo de Zona 2, caracterizado por ser un área construida con edificios de entre dos y cinco plantas, adosados o muy juntos, a menudo de ladrillo o piedra, como lo es el centro histórico de la ciudad.

- Dos (2) polígonos con tipo de Zona 3, caracterizados ser un área muy construida, de densidad media, con viviendas, locales y apartamentos en fila o unifamiliares, pero muy juntos, como lo son la zona Centro-sur de la ciudad y la zona norte de la ciudad.
- Un (1) polígono con tipo de Zona 4, que se caracteriza por ser un área de densidad media, de grandes edificios bajos y estacionamientos pavimentados, como lo son los centros comerciales de Unicentro, Santa Inés y Makro.
- Dos (2) polígonos con tipo de Zona 5, cuyas áreas se caracterizan por ser suburbanas de construcción media, de una o dos plantas, como lo son los barrios El Dorado, Patriotas, Manzanares y la región sur oriental de la ciudad.
- Cuatro (4) Zonas de tipo 6, que se caracterizan por ser áreas de uso mixto con grandes edificios en paisajes abiertos, como lo son el aeropuerto de la ciudad, el batallón Bolívar, La Remonta, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), y el campus de la Universidad Santo Tomás.

3.6.2 Identificación de tramos y lugares de medición para variables hidrométricas en los principales afluentes de la cuenca en estudio. Se ubicaron cuatro lugares para la medición del caudal de los principales afluentes de la cuenca de estudio por medio de sensores hidrométricos así:

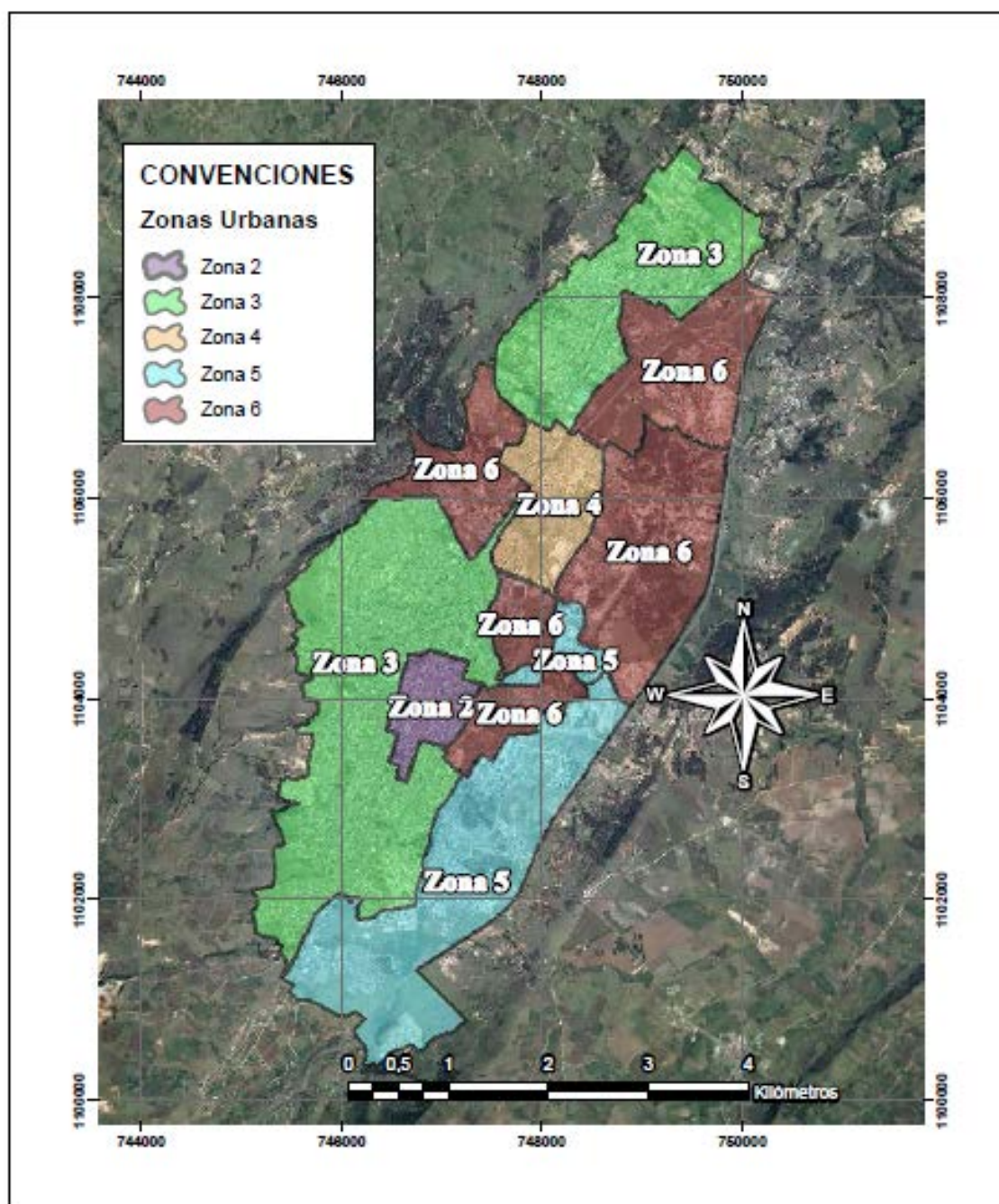
- Para la medición del caudal del río la Vega, se dispondrá un sensor localizado bajo el puente ubicado; en la intersección de la avenida universitaria con carrera 6ªC, en inmediaciones del supermercado El Chispazo del barrio Los Cristales.
- Para la medición del caudal el río Jordán, se dispondrá un sensor localizado 330 metros aguas abajo, de donde se une este río con el río La Vega, localizado bajo el puente de la calle 49a, en inmediaciones a los predios de la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA).
- Para la medición del caudal del río Jordán; será necesario hallar la diferencia de caudales del sensor anteriormente mencionado, y el sensor dispuesto para la medición del caudal del río La Vega.
- Para la medición del caudal del río La Cascada, se dispondrá un sensor localizado bajo el puente peatonal ubicado en las instalaciones deportivas de la Universidad de Boyacá, ubicada sobre la avenida universitaria.

- Para la medición del caudal total acumulado en la cuenca de estudio, se dispondrá un sensor localizado bajo el viaducto del Río Jordán, ubicado sobre la doble calzada.

La ubicación de sensores hidrométricos se puede observar en el mapa No. 16



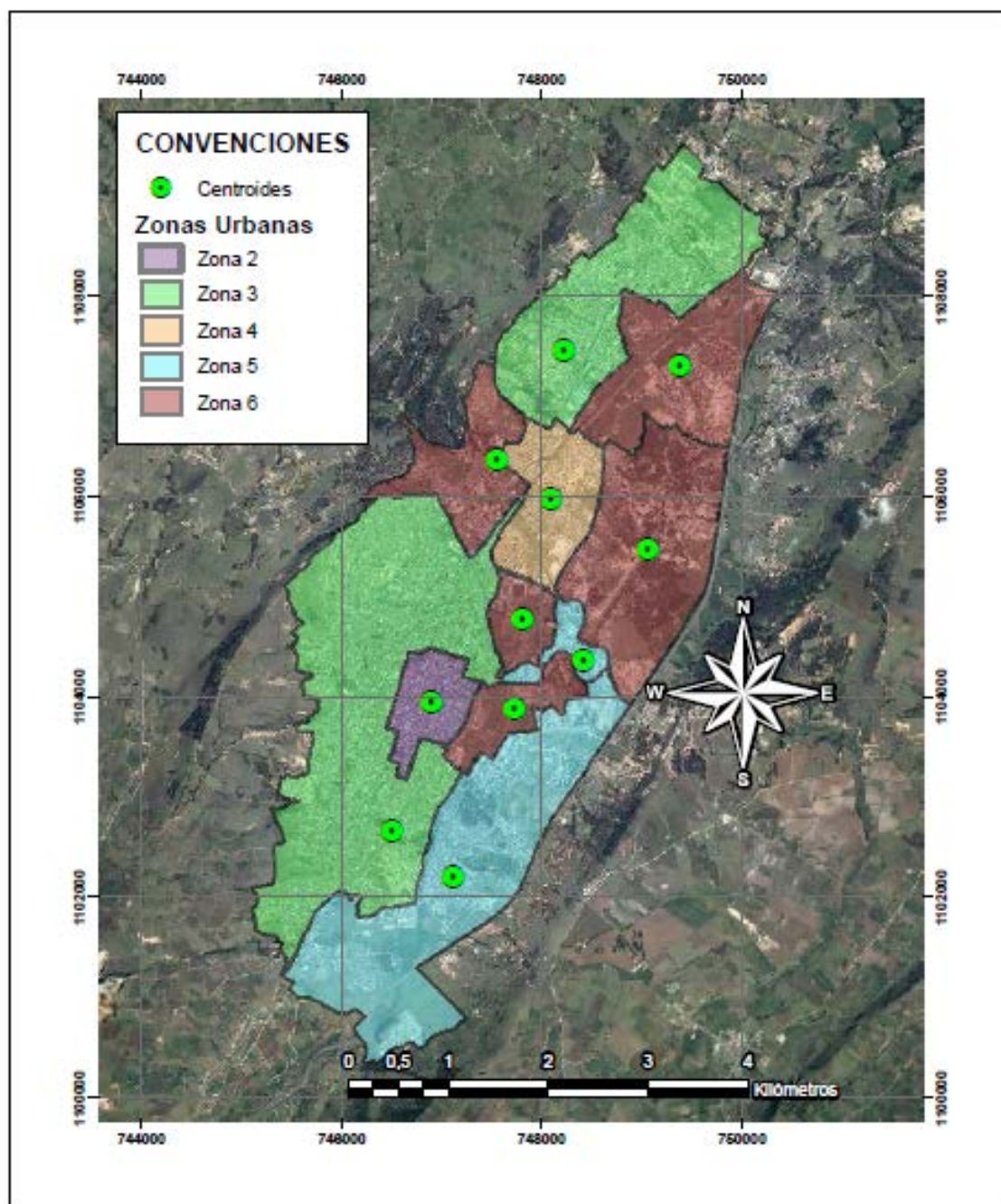
Mapa 14. Zonas climatológicas urbanas (ZCU) para Tunja.



Fuente: Elaboración propia

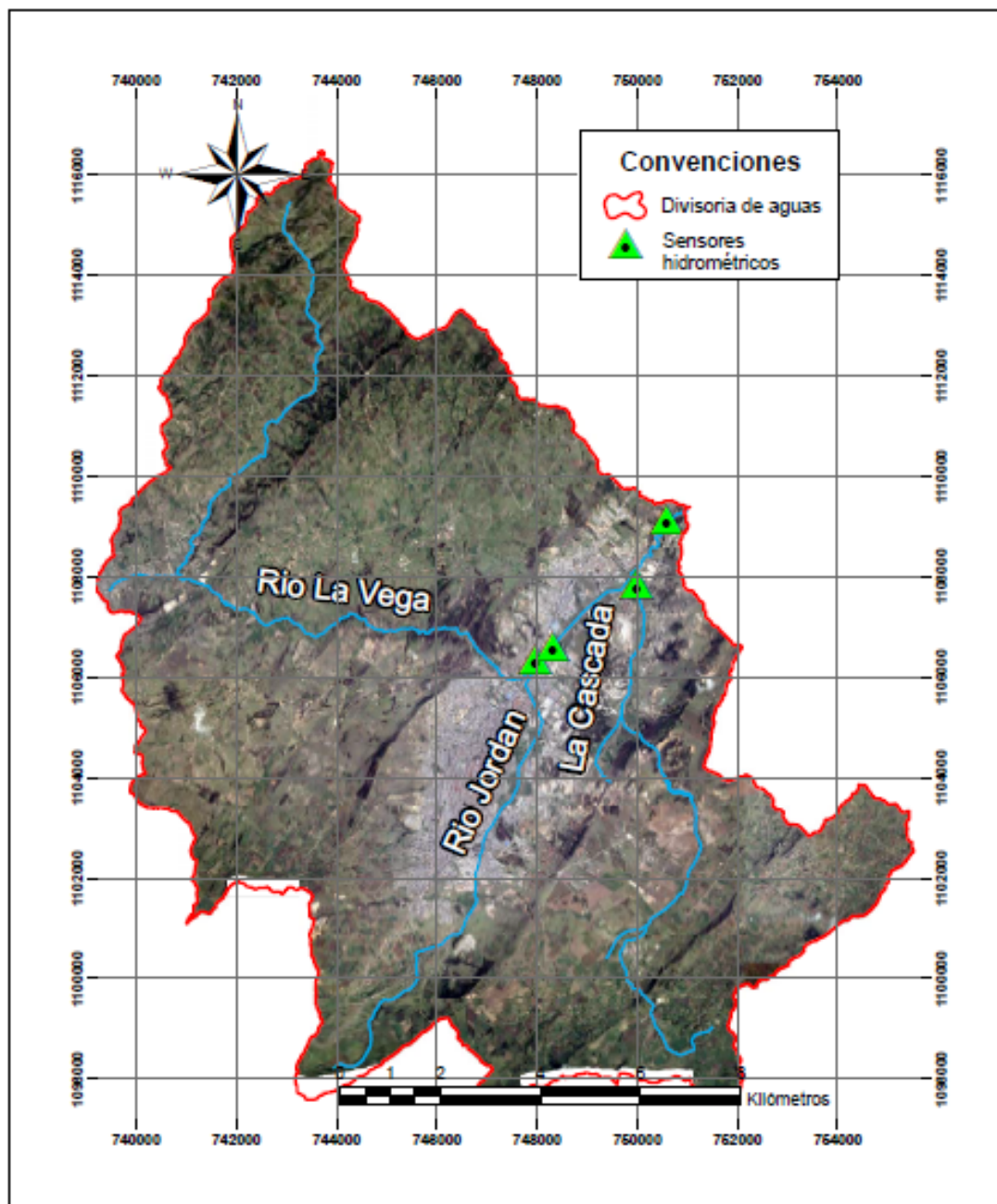


Mapa 15. Centroides zonas climatológicas urbanas.



Fuente: Elaboración propia

Mapa 16. Ubicación sensores hidrométricos.



Fuente: Los autores

### 3.6.3 Análisis geoestadístico de ubicación óptima de las estaciones meteorológicas.

3.6.3.1 Datos utilizados. Para la utilización de la extensión de geoestadística en el ArcGis es necesario ingresar datos promedio de precipitación para cada una de las estaciones actuales que se nombran en el primer capítulo. Se solicitó información para los últimos 50 años de los cuales se identificó una homogeneidad en los datos desde el año 1992, dándonos un periodo de análisis de 26 años.

El valor que se obtuvo para cada estación fue el promedio de precipitación anual, partiendo de los valores medios de precipitación para cada mes, llenando los datos faltantes con el promedio de precipitación de cada mes en el intervalo de los 26 años, estos datos se presentaban hasta un máximo de 6 meses lo cual puede ser daño en los instrumentos o mantenimiento de estos.

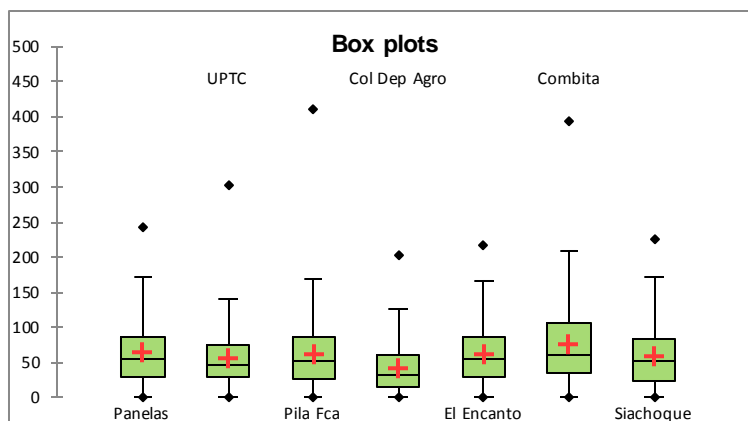
Con todas las casillas vacías llenas se procedió hacer análisis de datos anómalos por medio de los diagramas de caja y patilla haciendo uso de la extensión de Excel xstat, donde se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 47. Resultados estadística descriptiva

Statistic	Panelas	UPTC	Pila Fca	Col. Dep. Agro	El Encanto	Combita	Siachoque
Nbr. of observations	312	312	312	312	312	312	312
Minimum	0,000	0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Maximum	242,600	303,330	412,300	203,800	217,700	395,500	224,500
1st Quartile	27,750	28,775	27,275	13,575	28,900	34,975	24,100
Median	54,100	44,668	50,250	30,750	53,000	61,500	51,500
3rd Quartile	86,200	73,475	84,722	60,250	84,625	105,300	83,200
Mean	63,809	54,813	62,838	41,461	60,774	75,465	59,029
Variance (n-1)	2272,722	1694,233	3000,914	1479,882	1745,764	3040,275	1876,563
Standard deviation (n-1)	47,673	41,161	54,781	38,469	41,782	55,139	43,319

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6. Diagramas de caja y patilla.



Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la gráfica anterior se observa para cada estación un dato anómalo, el cual evidentemente es el dato máximo para estas. Al revisar estos datos si era necesario eliminarlos, se notó que estos datos corresponden a periodos de temporada de lluvias que desencadenaron las inundaciones en la UPTC y barrios vecinos correspondiente para los años 2010 y 2011. Además de presentarse en los mismos meses los cuales corresponden a la temporada de lluvias que tiene Tunja.

Con base en lo anteriormente mencionado los datos utilizados para hacer el modelado geoestadístico son los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 48. Precipitación media anual

ESTACION	PTA (mm)
Panelas	765,71
UPTC	663,71
Pila Fca	754,05
Col Dep Agro	497,53
El Encanto	728,06
Combita	905,58
Siachoque	711,86

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3.2 Análisis geoestadístico de las estaciones presentes en la actualidad. Se realizó un análisis geoestadístico teniendo en cuenta las tres (3) estaciones hidrométricas presentes en la cuenca de estudio, y cuatro (4) estaciones más

cercanas, en una proximidad de cuatro (4) kilómetros a partir de la divisoria de aguas de la cuenca.

Para este análisis se utilizaron los métodos de interpolación de Kriging e Inverso de la Distancia Ponderada (IDW) obteniendo los mapas 17 y 18.

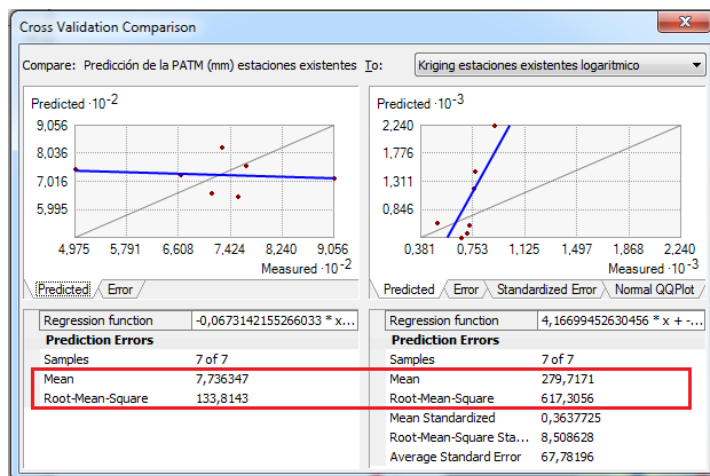
La utilización del Kriging como método geoestadístico para la realización de esta investigación, se hace con base los documentos citados en el numeral 1.9. Donde se encuentra a Vargas et al (2011) utilizar este método en el Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá. Aparicio Mijares (2012) en la caracterización espacial de una cuenca en México y a Rojas Polaco (2009) en la optimización de una red pluviométrica en España. Además este método nos puede mostrar el error en la predicción que este realiza, haciendo de este método aún más confiable.

Se puede apreciar que con la implementación de las estaciones actuales los modelos de interpolación espacial no pueden estimar la variable ni los errores de la predicción para una gran parte de la cuenca en estudio.

Habiendo realizado la interpolación mediante estos dos (2) métodos, pudimos emplear la metodología de validación cruzada para comparar la variación de los errores entre los dos (2) modelos con la ayuda del software Arc Gis como se observa en la siguiente figura.

Puede observarse que tanto el error medio cuadrático, como la media de los errores, son considerablemente menores en la interpolación realizada a través del modelo del Inverso Ponderado de la Distancia (IDW) que por el método de Kriging.

Figura 6. Validación cruzada entre el IDW y Kriging de las estaciones existentes.

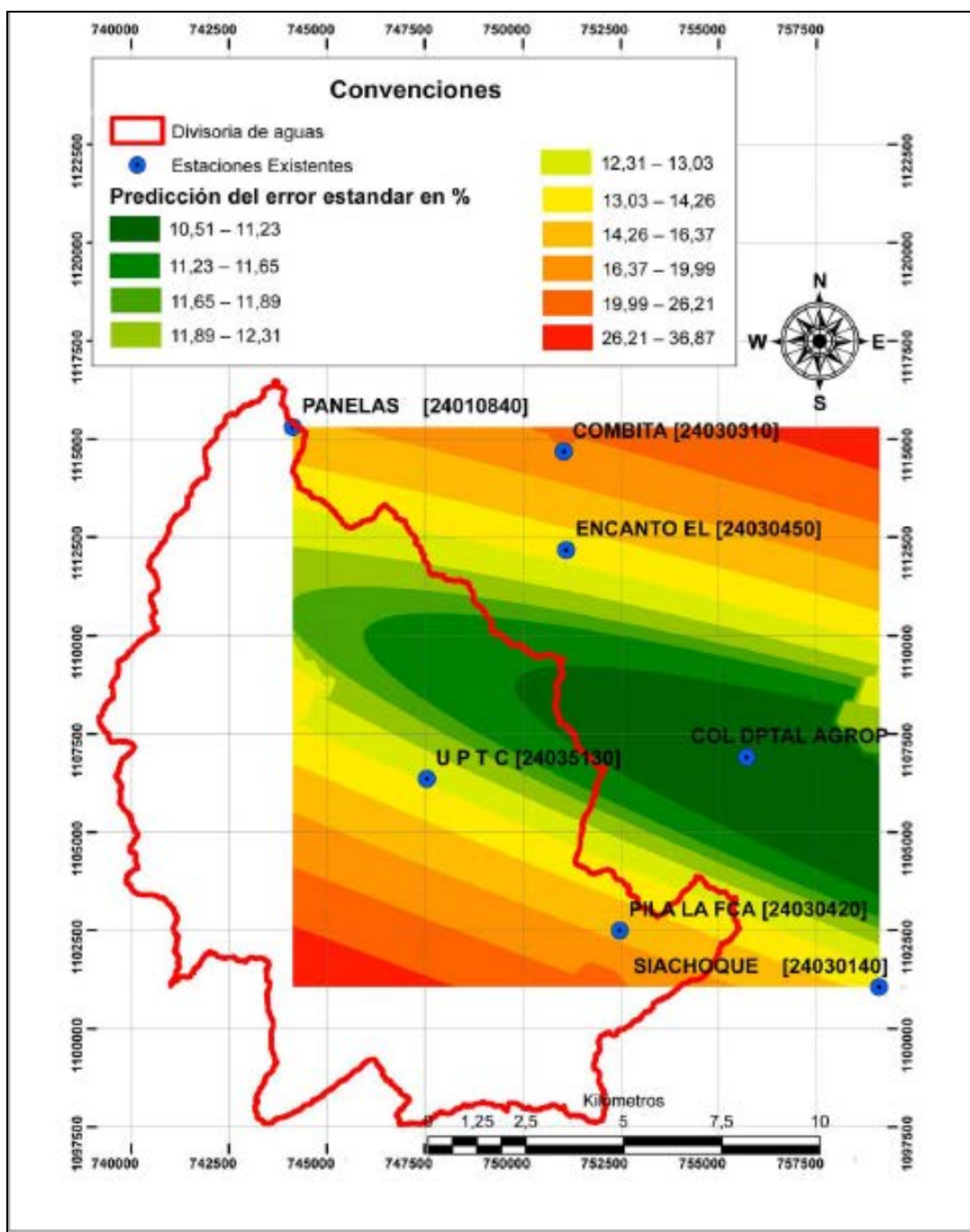


Fuente: Los autores.



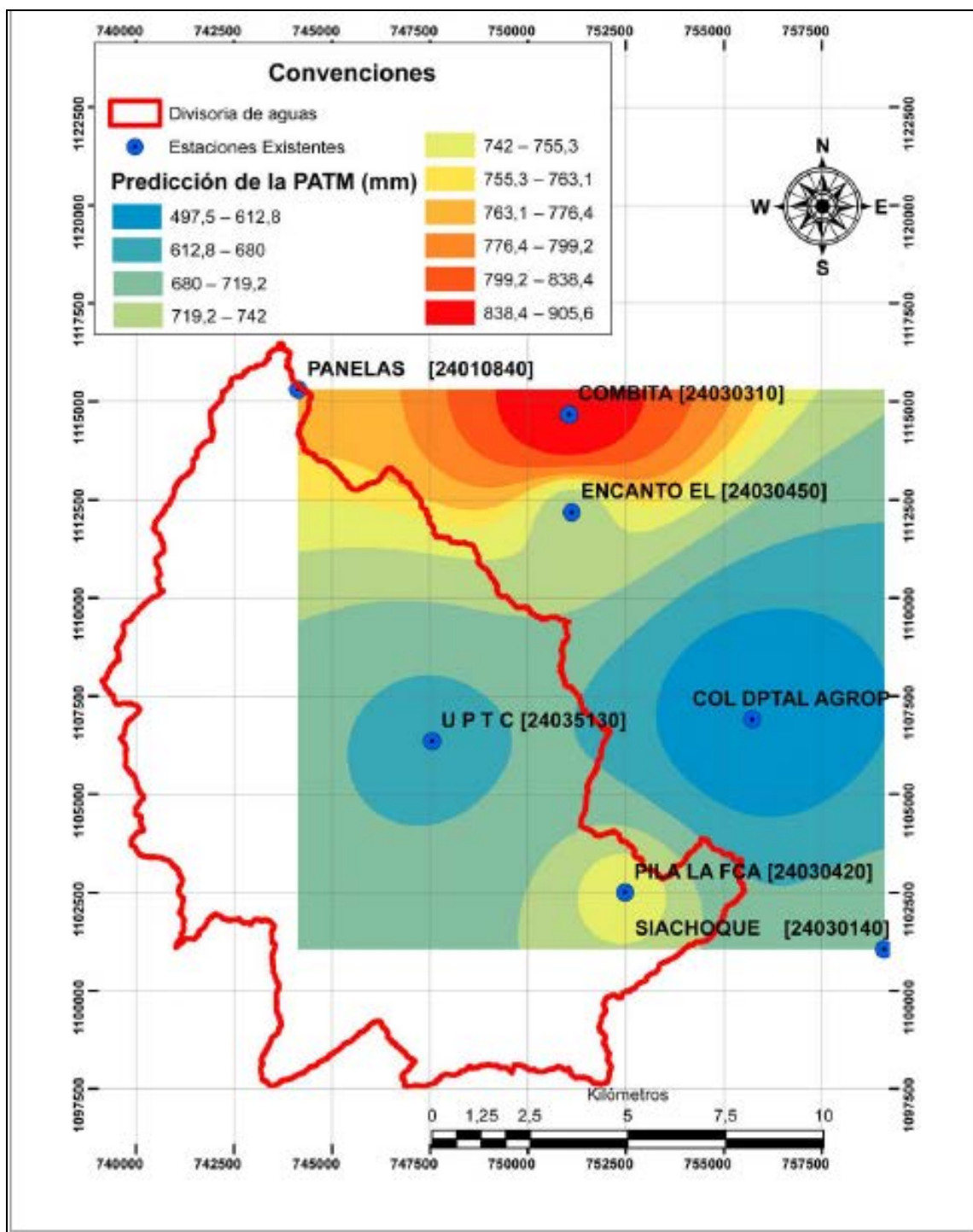
Cabe recordar que entre más cercano sea a uno (1) el error medio cuadrático, y a cero (0) la media de los errores significará que mejor será el modelo adoptado.

Mapa 17. Mapa de error estándar en porcentaje de las estaciones existentes en la cuenca de estudio mediante interpolación por Kriging.



Fuente: Elaboración propia

Mapa 18. Mapa de interpolación de la precipitación media anual (Pm) en milímetros mediante el método IDW.



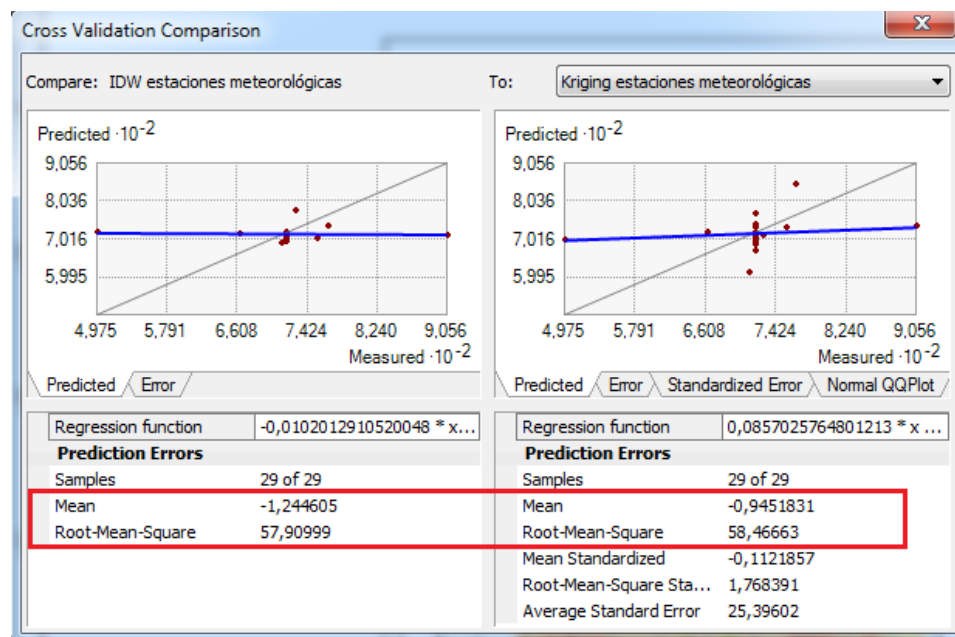
Fuente: Los autores.

3.6.3.3 Análisis geoestadístico de las estaciones presentes en la actualidad junto con las propuestas en este estudio. Para realizar el siguiente análisis geoestadístico se propone la implementación de diez (10) nuevas estaciones en el casco urbano distribuidas en los centroides de las Zonas Climatológicas Urbanas definidas previamente, y doce (12) nuevas estaciones en el área rural distribuidas de forma equitativa entre las cuencas Alta, Media y Baja, como se muestra en el mapa 19. Se tomó como valor de Precipitación Media Anual (Pm), el promedio de la (Pm) de las estaciones existentes, esto con el fin de evaluar netamente la variabilidad espacial y minimizar el error en la interpolación de la variable precipitación.

Se puede observar que al contar con un mayor número de estaciones hidrometeorológicas el error en las predicciones se reduce significativamente, como sucede en la parte central de la cuenca en estudio; de donde se pasa de tener un error de entre el 13,03% y 36,87%, a errores de entre 6,16% y 13,14 como se evidencia en el mapa No. 20.

Realizando nuevamente una validación cruzada entre las interpolaciones realizadas mediante Kriging, y el inverso del ponderado de la distancia (IDW); se puede apreciar que no hay una diferencia significativa del error medio cuadrático, y de la media de los errores entre estos dos (2) métodos como se observa en la figura No. 7.

Figura 7. Validación cruzada entre el IDW y Kriging de las estaciones nuevas junto con las existentes.



Fuente: Elaboración propia



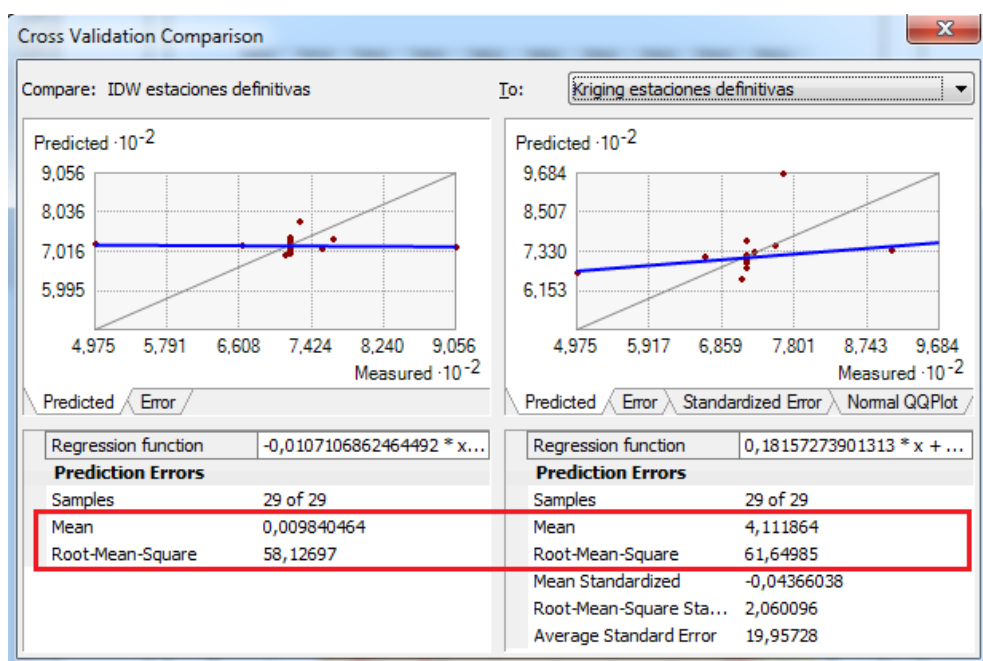
3.6.4 Planteamiento de la red de instrumentación hidrometeorológica y elaboración de cartografía. Luego del análisis geoestadístico se procedió a hacer pequeñas modificaciones en la ubicación de estaciones rurales, con el fin de optimizar al máximo la distribución, y reducir los errores producidos por la distancia. De lo anterior se obtuvo una distribución considerada la mejor, plasmada mediante mapas cartográficos cuya diferencia entre la primera y la distribución definitiva de estaciones se puede apreciar en el mapa No. 22.

Nuevamente se realizó un análisis geoestadístico con la distribución definitiva de las estaciones hidrometeorológicas, cuyos mapas de error y validación cruzada se muestran en los mapas 23 y 24 y en la figura No 8.

En la validación cruzada se puede apreciar que la media de los errores en el modelo IDW está muy próxima a cero, lo que corrobora que esta última distribución contribuye significativamente a la disminución de los errores.

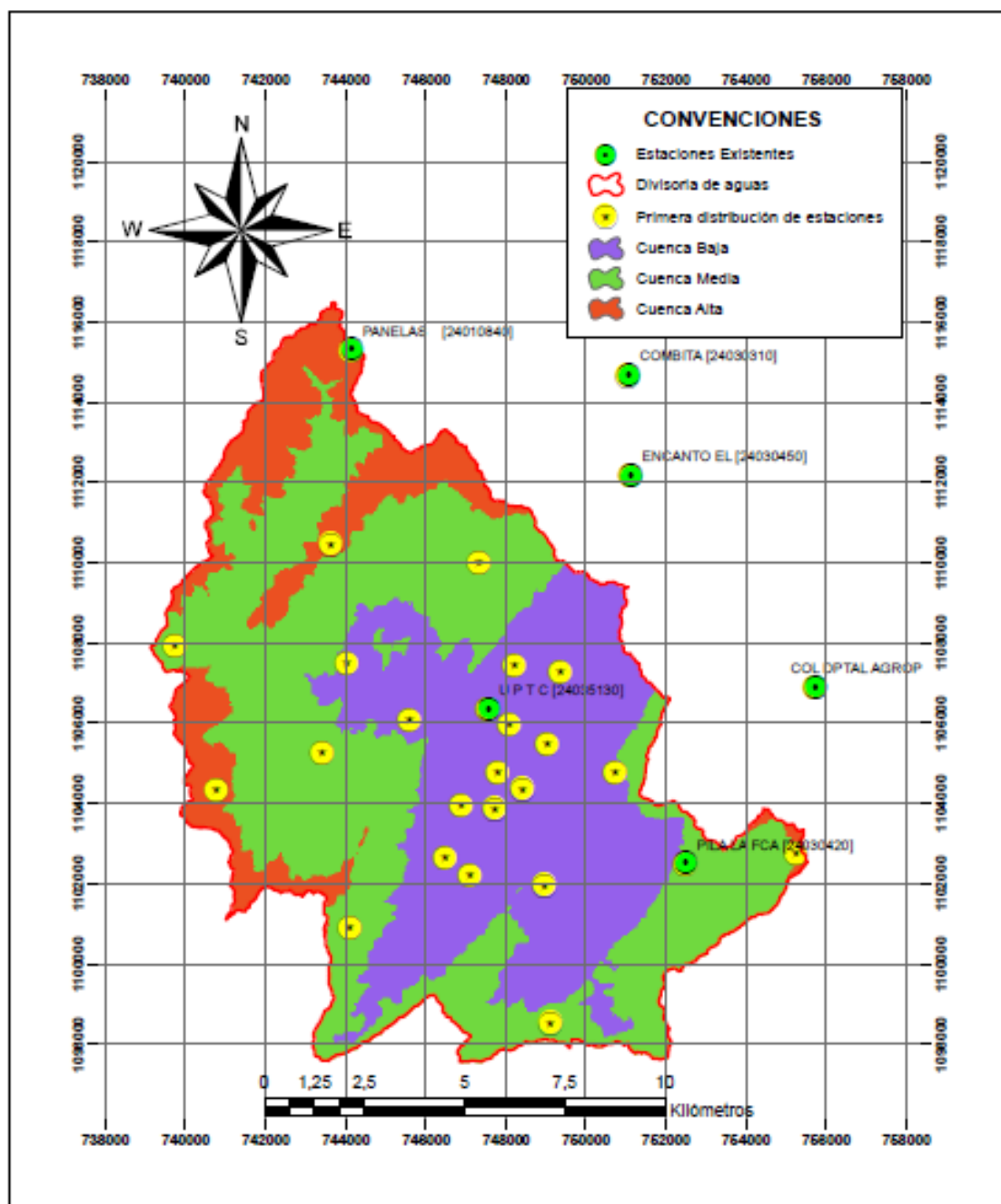
También podemos apreciar que en el mapa de error estándar de esta última distribución; el error más grande en la cuenca de estudio se encuentra entre el 14,79% y 20,42%, mientras que en la primera distribución teníamos el mayor de los errores entre el 18,09% y 24,74%.

Figura 8. Validación cruzada entre IDW y Kriging de la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas.



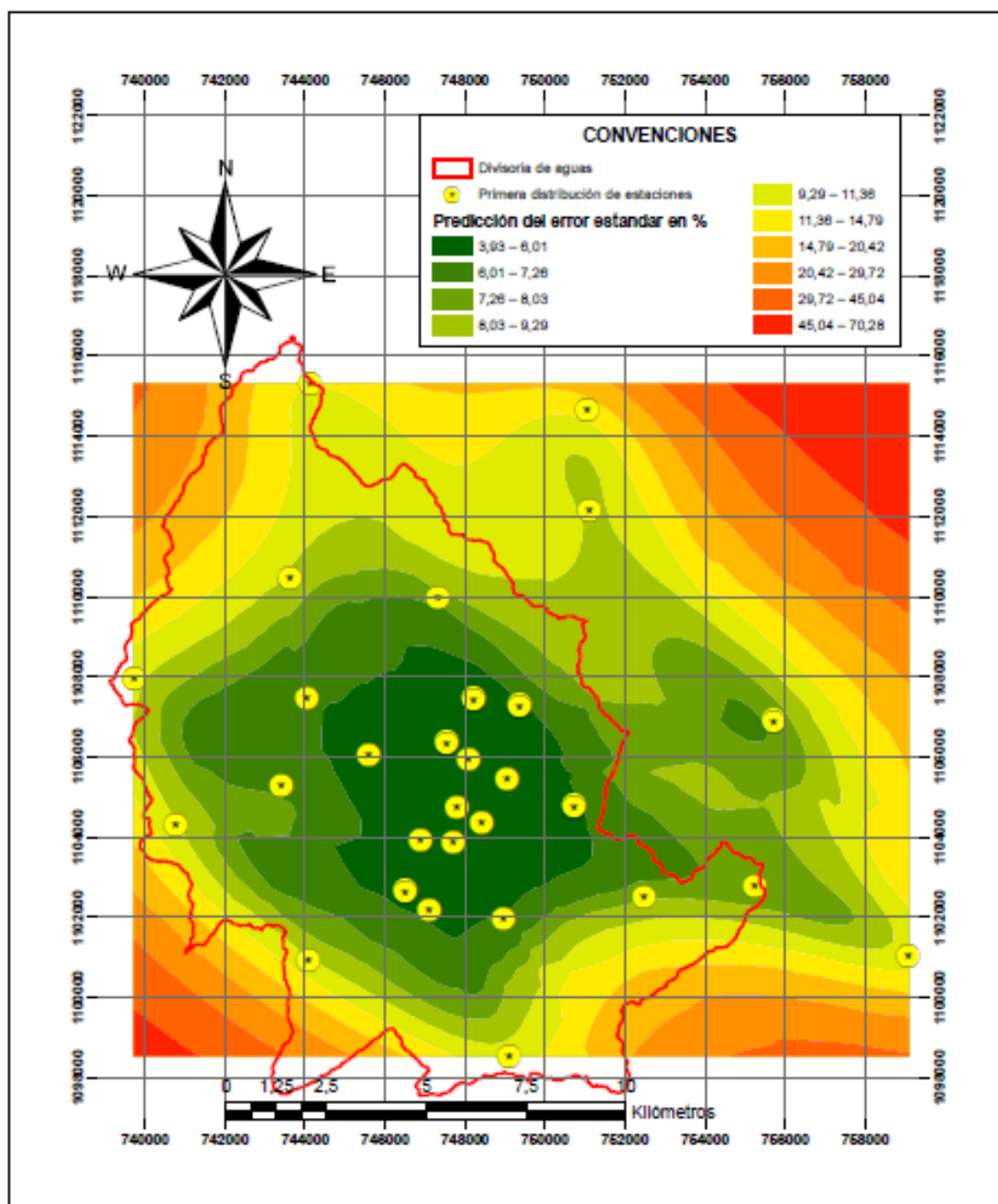
Fuente: Elaboración propia.

Mapa 19. Distribución de estaciones existentes y nuevas en cuenca alta, media y baja.



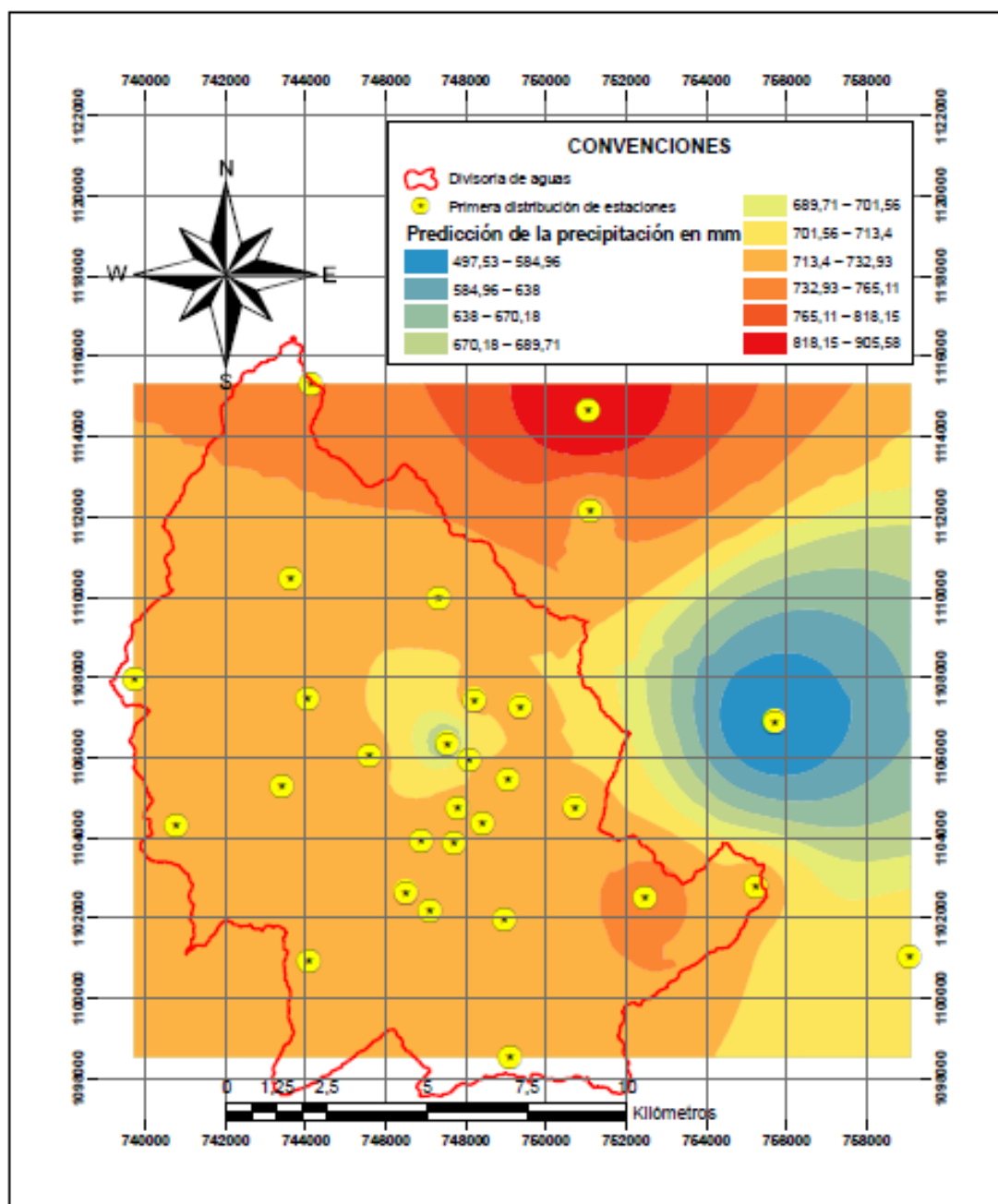
Fuente: Elaboración propia

Mapa 20. Error estándar en % para la primera distribución de estaciones propuesta mediante interpolación por Kriging.



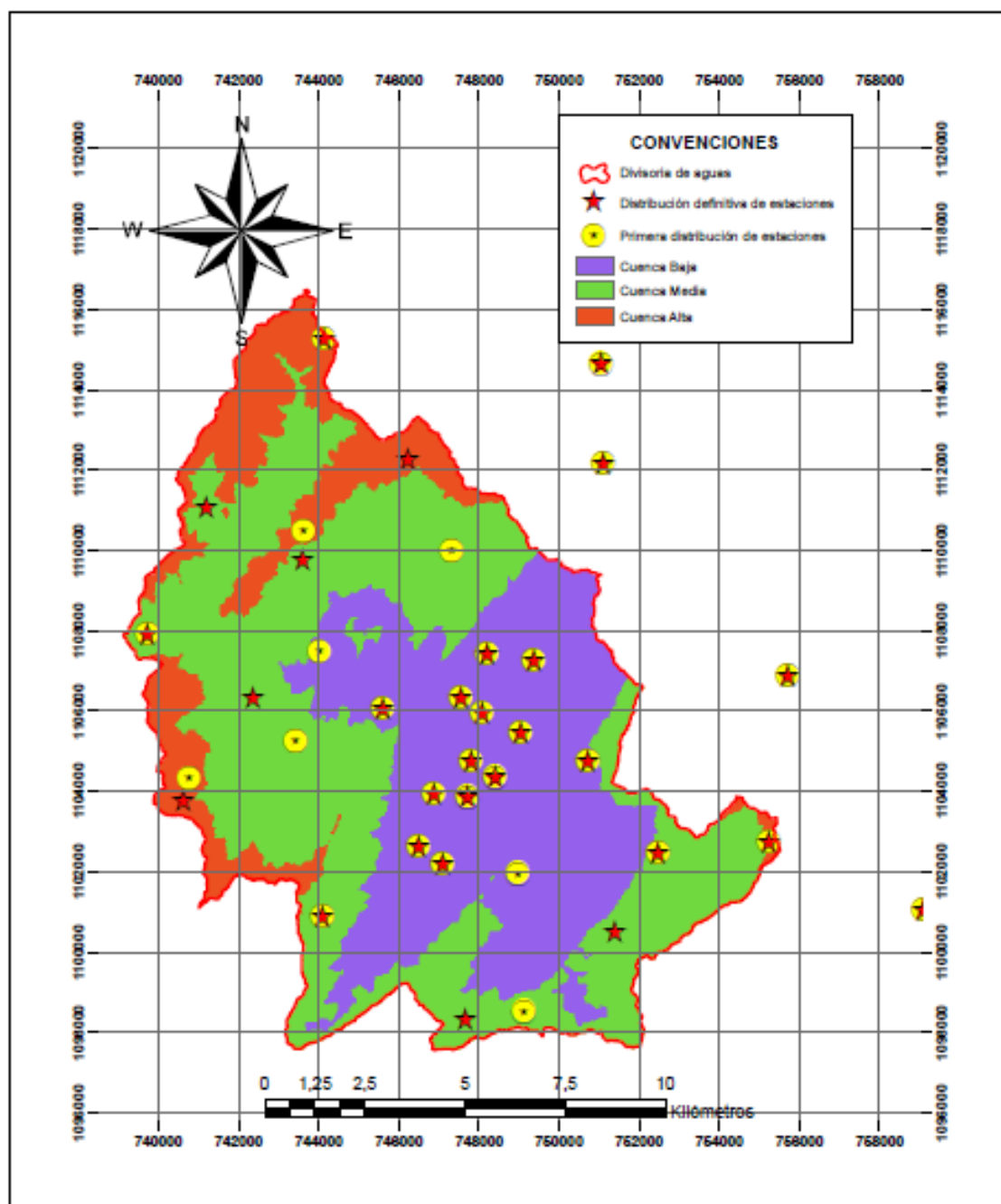
Fuente: Elaboración propia

Mapa 21. Predicción de la precipitación en milímetros para la primera distribución de estaciones propuesta mediante interpolación por IDW.



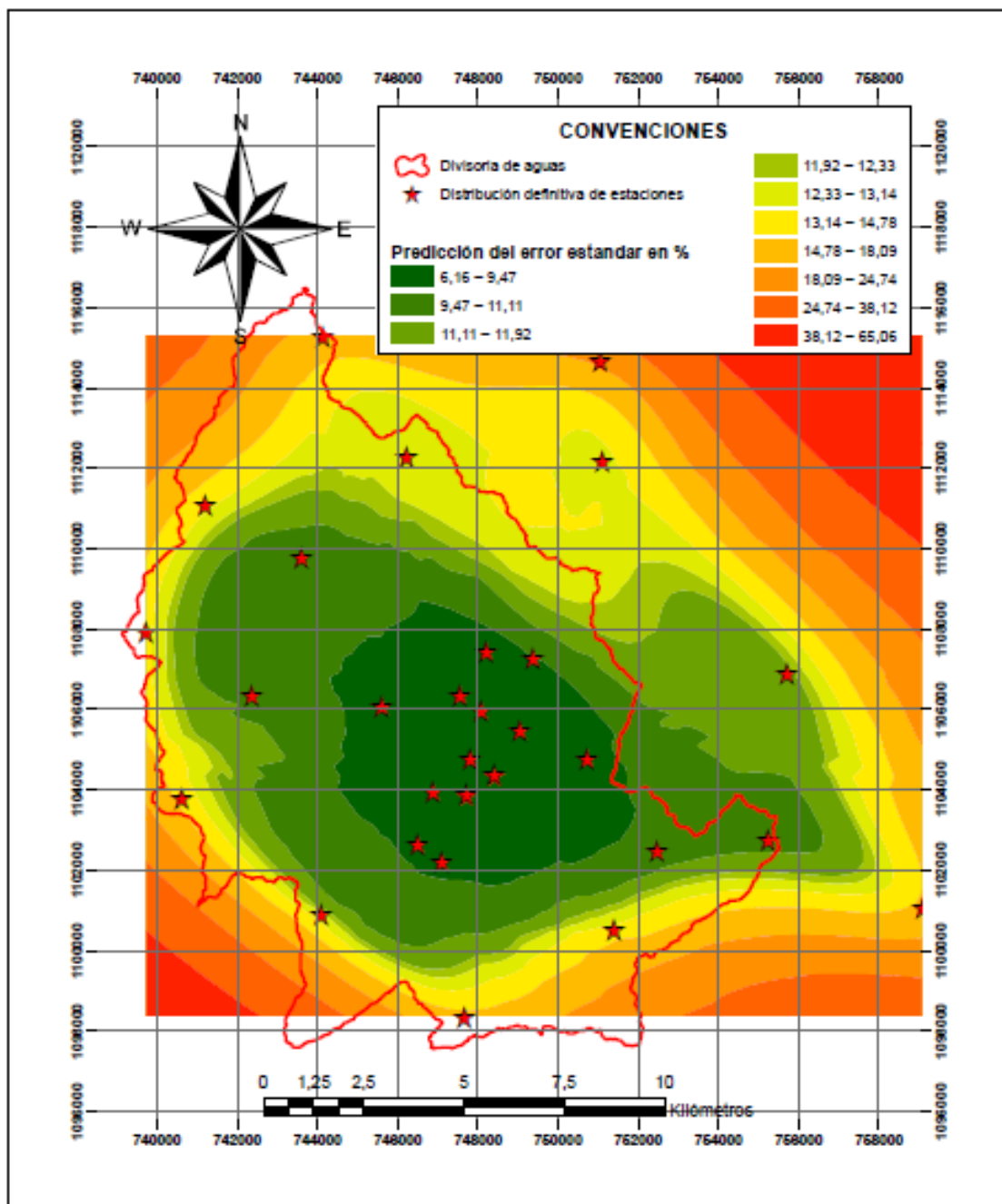
Fuente: Elaboración propia

Mapa 22. Diferencia entre las primeras propuestas de estaciones y la propuesta definitiva.



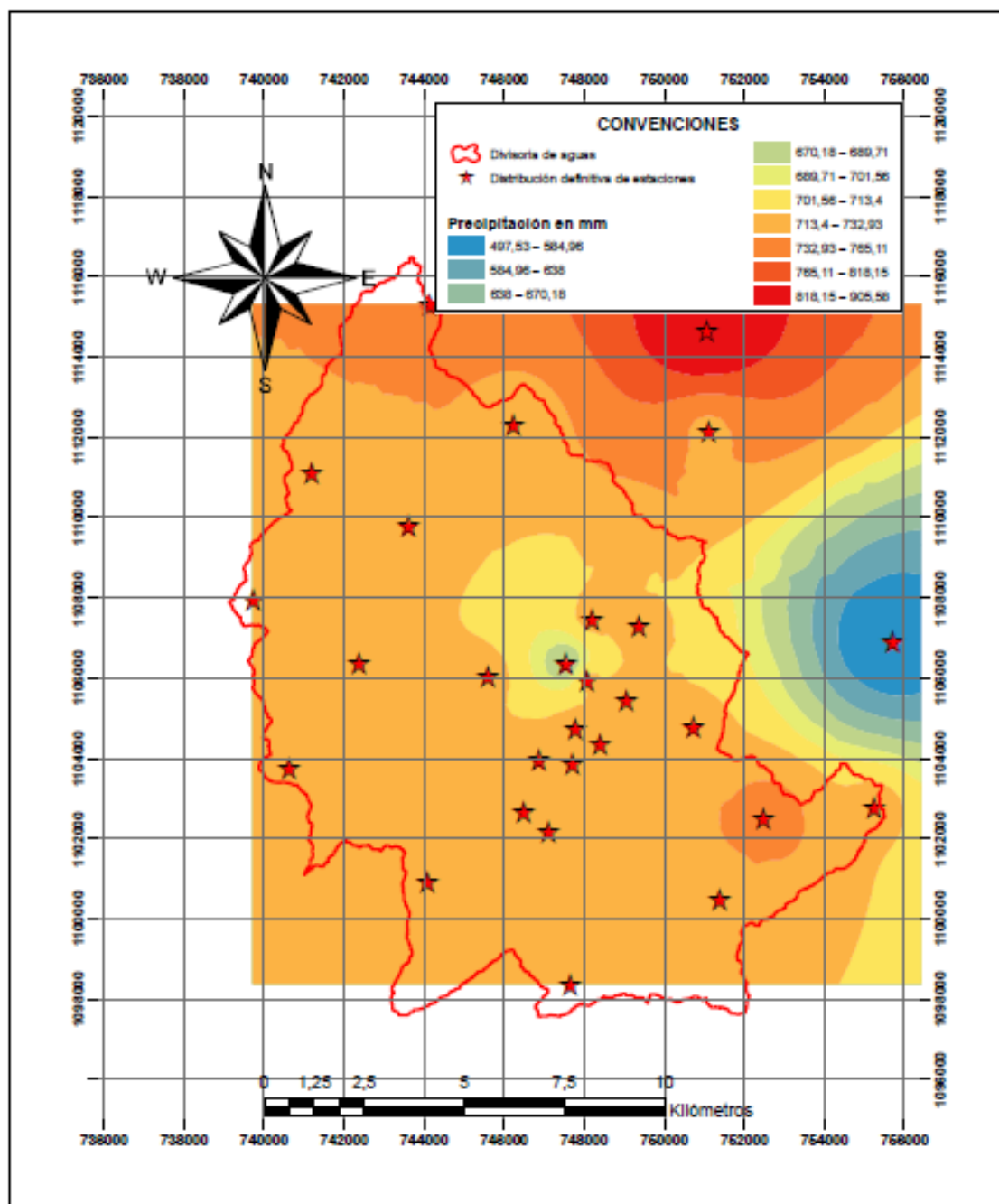
Fuente: Elaboración propia

Mapa 23. Error estándar para la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas mediante interpolación por el método de Kriging.



Fuente: Elaboración propia.

Mapa 24. Predicción de la precipitación para la distribución definitiva de estaciones hidrometeorológicas mediante interpolación por el método IDW.



Fuente: Elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis y caracterización fisiográfica de la zona de estudio permitió extraer información relevante para realizar el adecuado planteamiento de la red de instrumentación hidrometeorológica para las cuencas de los ríos Jordán, La Vega y Chulo. Esta información fisiográfica y cartográfica proporciona a la comunidad académica mayor precisión para la zona de estudio, que la reportada por diferentes autores, debido principalmente al empleo de cartografía base actualizada, un modelo digital de elevación de alta resolución espacial y altimétrica, y el empleo de modernas herramientas de análisis de los sistemas de información geográfica.

El empleo de herramientas geoestadísticas para la generación de mapas de error estándar permitió identificar que las estaciones existentes y las más próximas consideradas, no son suficientes para la generación de datos confiables de precipitación, ya que los modelos de interpolación no poseen información para generar resultados de aproximadamente la mitad de la zona de estudio.

El procedimiento de identificación de Zonas Climatológicas Urbanas (ZCU) para la ubicación de instrumentación meteorológica, según recomendaciones de la OMM, permitió dividir e identificar once (11) regiones con cinco (5) tipos de zonas (ZCU). Esta metodología fue de gran utilidad para proponer la implementación de diez (10) nuevas estaciones en el casco urbano, ubicadas en las Zonas Climatológicas Urbanas; junto con doce (12) nuevas estaciones en el área rural, distribuidas de forma equitativa entre las cuencas (parte alta, media y baja).

La distribución espacial de estaciones meteorológicas propuesta en este estudio es óptima, considerando la reducción de errores en la predicción de los modelos de precipitación y la atención a recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), relacionadas con la distribución de estaciones meteorológicas en zonas urbanas y la densidad de las mismas en zonas rurales de una (1) estación por cada diez (10) km<sup>2</sup>.

El empleo de técnicas geoestadísticas como la validación cruzada permitieron plantear la red definitiva de estaciones meteorológicas propuesta para este proyecto, la cual contempla incluir doce (12) estaciones nuevas y dos (2) estaciones existentes, para un total de catorce (14) estaciones distribuidas en la parte rural; y diez (10) estaciones nuevas y una (1) existente, en la parte urbana. Adicionalmente, se propone la instalación de cuatro sensores hidrométricos medidores de caudal, en puntos hidrológicos estratégicos ubicados a lo largo de los cauces de la zona urbana de las cuencas en estudio.

De acuerdo con los modelos hidrológicos referenciados en el estado del arte, los datos necesarios para un modelamiento con menor error y mayor efectividad, a nivel temporal, deben tener por lo menos cinco (5) años de registros, los cuales



deben ser tomados de manera cíclica además de registrar valores máximos y mínimos.

La selección de la instrumentación más apropiada para el proyecto fue realizada de acuerdo con las características especificadas por las diferentes entidades e instituciones, dando prioridad a los proveedores nacionales, los cuales aproximadamente son cinco (5), los más importantes, que en su mayoría ofrecen los mismos productos, con el cumplimiento especificaciones mínimas y con una buena precisión en sus medidas, precios similares en las estaciones y cuya variación depende de los accesorios adicionales que sean incluidos. La mejor opción de estación meteorológica en cuanto a garantías respecto a reputación, mayor uso y precio, es la ofrecida por las estaciones de las marcas Davis y Oregon, las cuales son de gran uso en Estados Unidos.

Las tecnologías de instrumentación disponibles en el mercado cumplen con el régimen de registro necesario para un correcto uso de los modelos hidrológicos, ya que cuentan con memorias de almacenamiento hasta por cinco (5) años, con lecturas cada minuto y registro de valores máximos y mínimos.

El costo total de las veintidós (22) nuevas estaciones meteorológicas planteadas en la red de monitoreo es de \$219'608.550 (iva incluido) pesos moneda colombiana. El valor aproximado de los sensores hidrométricos es de \$3'340.000.

El futuro empleo de modelos matemáticos hidrológicos lluvia – escorrentía para la zona de estudio deberá necesariamente considerar la previa implantación de nuevas estaciones meteorológicas, que cubran las cuencas de los ríos Jordán, La Vega, Chulo y la zona urbana de la ciudad de Tunja.

## RECOMENDACIONES

Según las recomendaciones de la OMM descritas en los numerales 1.3.1.1, 1.3.1.2, 1.3.1.4, y 1.3.1.7 de este libro; se recomienda que el emplazamiento de estaciones meteorológicas en el casco urbano, para las zonas tipo 2, 3 y 4 según el mapa de Zonas Climatológicas Urbanas (ZCU) se realice sobre mástiles de 1.5 veces la altura de las edificaciones promedio de dichas zonas.

En la futura fase de operación, para la red de instrumentación planteada en esta investigación, es necesario la presencia de personal atento al funcionamiento de los aparatos, el respaldo permanente de la información y la presentación de la misma en una página en la red mundial de comunicaciones (internet). La disponibilidad horaria debe ser mínimo de medio tiempo, hasta que la red esté funcionando en su totalidad.

El costo de la adecuación e implantación de las estaciones no fue incluido dentro del precio mostrado en esta investigación. La implantación generalmente consta de un cerramiento en malla de dos (2) metros por dos (2) metros con una puerta de acceso. En algunos casos es necesario la construcción de pedestales o planchas de piso, según lo sugiera el fabricante.

## BIBLIOGRAFIA.

APARICIO MIJARES, Francisco Javier et al. Caracterización espacial de redes pluviográficas: caso de la cuenca Peñitas. En: Tecnologías y Ciencias del Agua. Enero-Marzo, 2012. Vol. III. N° 1. p103-121.

DOMINGUEZ CALLE, Efraín y LOZANO BAEZ, Sergio. Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. En: Rev. Acad. Colomb. Cienc. Julio-Septiembre, 2014. N°38, p321-332.

GIRALDO HENAO. Ramon. Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación: Predicción espacial. Primera edición. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 94p.

GONZÁLEZ PARRA, Juan Diego. Modelación integrada del sistema de drenaje – PTAR – río de la ciudad de Bogotá. Escenarios de control regional. Tesis de Maestría. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2011. 9-11p.

GONZALEZ VELANDIA, Julio Cesar. La gestión del riesgo en desastres en las inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos. Bogotá. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. 2014. 73 p.

IDEAM, Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. Observación y Medición en Aguas Superficiales de Niveles, Caudales y Sedimentos. Imprenta Nacional de Colombia, 2007. 162p.

IDEAM, Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. Observación y Medición en Aguas Superficiales de Niveles, Caudales y Sedimentos. Imprenta Nacional de Colombia, 2007. 162p.

JIMENEZ AVELLA, Wilson Alejandro. Instrumentación y análisis de la variación espacial y temporal de la precipitación en la respuesta de una cuenca urbana. Caso de estudio campus Tesis de Maestría. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2008. 17 p.

JIMENEZ ESCOBAR, Henry. Hidrología Básica 1: La cuenca hidrográfica. Segunda Edición corregida. 1986. 249 p.

METCALF & EDDY INC. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition ed. Hill, Mc Graw. 2003.

MONSALVE SÁENZ, German. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería 1995. 359p.

MULLER, Catherine L; CHAPMAN, Lee; GRIMMOND, C.S.B; YOUNG, Duick T; CAI, Xiamonig. Sensors and the city: areview or urban meteorological networks. En: International Jorunal of Climatology. June, 2013. Volume 33, Issue 7, p. 1585-1600.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Velocidad y dirección del viento. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la presión atmosférica. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la Humedad. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición del viento de superficie. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la precipitación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la radiación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p.

OMM, Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Medición de la evaporación. Edición 2008. Ginebra, 2014. 773p

PONCE, Víctor M. Catchment Hydrology. En: Engineering Hydrology: Principles and Practices. 2 ed. Online: 2014. 389p.

ROJAS POLACO, María Isabel y MORA MORA, Luis Eduardo. Diseño óptimo de redes pluviométricas. En: Revista Forestal Venezolana. Enero-Junio, 2009. Vol. 53. p9-22

SCHÜTZE, M., D. BUTLER, AND B. BECK. Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems. Londres. Springer-Verlag. 2002.

TUNJA, Municipio de. Nuestro Municipio. [En línea]. Tunja: Alcaldía Municipio de Tunja. 2017. Disponible en: [http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml).

TUNJA. CONSEJO MUNICIPAL. Acuerdo municipal No. 0016. 2014 (28, Julio, 2014). Plan de Ordenamiento Territorial. Diario Oficial. Tunja. Anexo Físico-Biótico. 27 p.

TUNJA. CORPOBOYACA. Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca alta del río Chicamocha. 2006. (31, Julio, 2006). POMCA. Diario oficial. Tunja. Diagnostico capítulo I. 311 p.

UNGRD, Guía para la Implementación de Sistemas de alerta temprana. Sistemas de monitoreo y alerta temprana. Bogotá, 2016. 31p.

VARGAS, Andrés. SANTOS, Ana. CARDENAS, Eder. OBREGON, Nelson. Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. En: Revista DYNA, 2011. Vol. 78. N° 167.

VALDES QUINTERO, Juan Carlos. PARRA TORO, Juan Camilo. HERRERA CADAVID, Sebastián. Modelación espacial para la ubicación de estaciones meteorológicas en cuencas hidrográficas. En: Revista Politécnica. Julio-Diciembre, 2013. Volumen 9, Año 9, N° 17. p9-18.